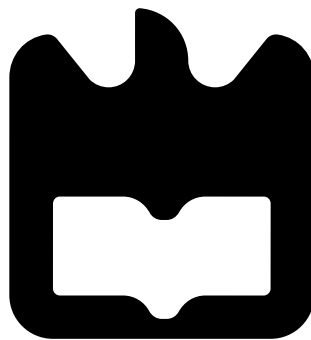




**Hugo Manuel
Oliveira de Miranda**

Sistemas RFID UHF





**Hugo Manuel Oliveira
de Miranda**

Sistemas RFID UHF

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor João Nuno Pimentel da Silva Matos, Professor do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho

Professor Catedrático do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (por delegação da Reitora da Universidade de Aveiro)

vogais

Professor Doutor Rafael Ferreira da Silva Caldeirinha

Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (arguente)

Professor Doutor João Nuno Pimentel da Silva Matos

Professor associado da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, por todo o incentivo e ajuda que me deram não só durante a minha formação académica, mas também durante a minha formação pessoal.

À minha namorada pela paciência e apoio incondicional na realização deste trabalho.

Aos meus amigos por toda a ajuda e bons momentos que me proporcionaram ao longo do meu percurso académico.

Ao meu orientador, o Professor Doutor João Nuno Pimentel da Silva Matos, pelo apoio, conhecimento transmitido, motivação e pelas oportunidades proporcionadas.

À instituição, colegas e colaboradores do Instituto de Telecomunicações pelo auxílio prestado e pelas excelentes condições proporcionadas ao longo da realização deste trabalho.

A todos, Muito Obrigado por tudo!

Palavras-chave

RFID UHF, Front End de RF, Antenas *Microstrip*, *Tags* Passivas, Substrato de papel, Impressão jato de tinta.

Resumo

O interesse por sistemas de identificação por radiofrequência (RFID) tem aumentado de forma significativa nos últimos anos, principalmente na identificação e *tracking* de objectos, animais e pessoas através de um modo de comunicação sem fios. Esta comunicação é feita por ondas de rádio que são transmitidas por um leitor, através de uma antena a um identificador (etiqueta) que atribui a um objeto uma identidade única, o chamado código de identificação único. Esta tecnologia não só identifica, mas também armazena dados atribuídos a determinado objeto, animal ou pessoa. No entanto, o RFID apresenta ainda consideráveis limitações, que inviabilizam o seu uso. Duas importantes razões que tornam esta tecnologia menos interessante é o seu excessivo custo, causado não só pelos preços dos leitores e das antenas, mas também pelo preço do processo de fabrico das etiquetas; e devido ao facto de serem usados leitores não-reconfiguráveis a novos protocolos de comunicação, novas etiquetas ou até mesmo alterações de frequências. O primeiro objetivo deste projeto foi então desenvolver um *front end* de radiofrequência para a construção de um leitor RFID UHF reconfigurável de baixo custo, baseado em circuitos programáveis DSP ou FPGA, com um processador embutido e *software-defined radio*. Com isto pretende-se que os leitores RFID não dependam de *transceivers* RFID comerciais. Além disso, com este estudo pretendeu-se também a desenvolver antenas e etiquetas RFID, em material orgânico flexível, com um processo de produção de etiquetas simples e de baixo custo. Na primeira parte deste projeto, foi proposto um *front end* para a banda RFID UHF Europeia e para a banda Americana, que poderá ser usado, no futuro, no desenvolvimento de um leitor RFID. Este *front end* foi desenhado para ser robusto, de baixo custo, e com o objetivo de emitir e receber sinais de rádio. Na segunda parte, foram desenvolvidas duas antenas para leitores, uma para a banda RFID UHF Americana e outra para a banda RFID UHF Europeia. Por último, foi alterada uma impressora convencional, comercialmente disponível, e foram feitas também alterações na tinta de impressão, tornando-a condutora, para impressão de antenas para etiquetas RFID em substratos à base de papel. Todos os parâmetros fundamentais das antenas foram simulados numericamente e testados experimentalmente. As duas antenas testadas mostraram boas performances, em particular, a antena para a banda RFID UHF Europeia, cujos valores resultantes dos testes experimentais foram muitos similares aos encontrados computacionalmente, sendo mesmo melhores para alguns parâmetros. Esta antena, não só apresentou uma boa performance na banda mencionada, mas também na banda RFID UHF Americana. Foram desenvolvidas sete etiquetas RFID, ou seja, desenhadas e impressas usando a impressora jato de tinta modificada, e testadas posteriormente. Todas as etiquetas funcionaram, embora uma delas não tenha apresentado resultados tão satisfatórios. Podemos então concluir que a nossa tecnologia permitiu ter etiquetas impressas por uma impressora convencional e, desta forma, poderá oferecer uma maior independência às empresas que as produzem, podendo mesmo ser utilizada em ambientes de I&D, em Universidades ou Escolas, de modo simples e barato.

Palavras-chave

UHF RFID, RF Front End, Microstrip Antennas, Passive Tags, paper substrate, inkjet-printed.

Abstract

In recent years, Radio Frequency Identification (RFID) technology has received special attention, especially for identifying and tracking objects, animals and people through a wireless communication connection. Radio waves transmitted from a reader, through an antenna to an identifier, called tag, which attributes an Unique Identification Number (UID) to a object, animal or person are used for this communication. This technology not only helps to identify, but also to collect data attributes about a certain person or object. However, RFID still has important limitations, which slows down its growth considerably. The two main reasons for that are related not only with the excessive cost of this system due to the readers and antennas, but also because it uses non-reconfigurable readers to new communication protocols, tags or even changes in frequencies. Therefore, the first purpose of this project was to develop a front-end to be included into a low-cost reconfigurable RFID UHF reader, based on FPGA or DSP, with an embedded processor and a software-defined radio. In a long-term, it is intended to have readers that does not require commercial RFID transceivers. The second purpose of this study was to develop a simple and low-cost manufacturing process of antennas and tags in flexible and organic material. Firstly, a front end for RFID UHF bandwidth across the European Union and in the North America was proposed to be implemented in the future. This front end was designed to be low-cost, robust, in order to emit and receive radio signals. Secondly, two antennas, respectively, for an American and European UHF bandwidth RFID reader were developed in this project. Ultimately, an ordinary home inkjet-printer was modified to jet conductive ink, created as a part of this study, to print tag antennas in paper based substrate. All of the fundamental parameters that needed to be evaluated for antennas were experimentally simulated and tested for the two antennas. Both showed high performances, particularly, the antenna for a European UHF bandwidth RFID reader. This antenna obtained results more similar to the numerical model, and experimental findings were even better for some parameters. Its performance was found to be high even for an American UHF bandwidth RFID reader. Furthermore, seven RFID tags were developed, meaning they were designed and printed on the modified home inkjet-printer, and then its performance was tested. Although one of these tags showed not to be highly efficient, all tags worked adequately for the purpose. Therefore, we can conclude that our technology allowed to print RFID tags using a modified home inkjet-printer, indicating that this method can offer more independency to RFID tag manufacturers and, also allow an extensive use of this system in I&D environment, University or Schools, since it is simple and cheap.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do Documento	3
1.4 Contribuições originais desta dissertação	4
2 RFID	5
2.1 A História	5
2.2 Constituição dos Sistemas RFID	7
2.2.1 Leitor e Antena RFID	8
2.2.2 <i>Tags</i> RFID	9
Passivas	10
Semi-passivas ou Semi-ativas	10
Activas	11
2.3 Aplicabilidade	12
2.4 Frequências de Operação	13
2.5 Protocolos	17
Protocolo EPC Global	17
Electronic Product Code (EPC) Generation-2 Class 1 UHF RFID	18
Protocolos ISO	19
2.6 Soluções Comerciais	20
3 RFID <i>Front End</i>	23
3.1 Arquiteturas de Rádio	23
3.1.1 Receção	23
3.1.2 Transmissão	24
3.2 <i>Front End</i> RFID	25
3.2.1 Blocos do Front Ent	25
Desmodulador	26

	PLL	27
	Modulador	29
	Filtros	30
	Amplificador de Potência	31
	ADC e DAC	31
	Programador auxiliar do sintetizador	31
4	Antenas RFID	33
4.1	Introdução	33
4.2	Parâmetros Fundamentais das Antenas	34
4.2.1	Diagrama de Radiação	34
4.2.2	Diretividade	36
4.2.3	Ganho e Eficiência	37
4.2.4	Impedância de Entrada	37
4.2.5	Largura de Banda	38
4.2.6	Polarização	38
	Axial Ratio	38
4.3	Antenas Impressas (Microstrip)	39
4.3.1	Métodos de análise	40
4.3.2	Métodos de Alimentação	41
	Alimentação por Linha de <i>Microstrip</i>	42
	Alimentação por Cabo Coaxial	43
	Alimentação por Fenda	43
	Alimentação por Acoplamento de Aproximação	44
4.3.3	Técnicas para Polarização Circular	45
4.4	Implementação da Antena RFID Banda Americana	46
4.4.1	Resultados das Simulações	47
	Layout	47
	<i>Return loss</i>	49
	Diagrama de Radiação	50
	Axial Ratio	51
	Impedância	51
4.4.2	Resultados Experimentais	52
	Discussão	54
4.5	Implementação da Antena RFID Banda Europeia	55
4.5.1	Resultados das Simulações	56
	Layout	57
	<i>Return loss</i>	58
	Diagrama de Radiação	59
	Axial Ratio	60
	Impedância	60
4.5.2	Resultados Experimentais	61
	Discussão	63

5	<i>Tags</i> RFID UHF	65
5.1	Introdução	65
5.2	Importância do Custo	65
5.3	Substratos	66
5.4	Técnicas de Fabrico de Antenas de Etiquetas RFID	67
5.4.1	Deposição por vácuo	67
5.4.2	Corte	67
5.4.3	Fotolitografia	68
5.4.4	Serigrafia e impressão de tintas condutoras	68
5.5	Processo de montagem	69
5.6	Desafio do Design de antenas RFID	70
5.7	Impressão de Antenas com Impressora Jato de Tinta Comercial	73
6	Implementação de <i>Tags</i> RFID UHF	75
6.1	Tag 1	75
6.2	Tag 2	76
6.3	Tag 3	77
6.4	Tag 4	78
6.5	Tag 5	79
6.6	Tag letras e kittytag	80
6.7	Resultados Experimentais	81
7	Conclusões	83
7.1	Conclusão	83
7.2	Trabalho Futuro	84
A	1ª Conferência URSI AT-RASC (Atlantic Radio Science Conference), 2015	87
B	Front End de RF	92
B.1	Desmodulador IQ LT5575	92
B.2	Sintetizador de RF ADF4351	94
B.3	Modulador IQ LT5568	96
B.4	Filtro B3717 e Filtro B3588	98
B.5	Amplificador de Potência	99
B.6	ADC e DAC	101
B.7	Programador auxiliar do sintetizador, PIC18LF2550	103
C	Imagens das Antenas construídas	106
C.1	Antena RFID banda americana	106
C.2	Antena RFID banda Europeia	107
	Bibliografia	109

Lista de Figuras

1.1	Fluxo de gestão de stocks com sistema de RFID na área do retalho.	2
2.1	Uso de radiação <i>backscattered</i> para comunicar com um operador de radar.[3] .	6
2.2	Diagrama de um sistema de RFID. [2]	7
2.3	Possível arquitetura de rádio <i>transceiver</i> para leitor RFID.[6]	8
2.4	Investigadores britânicos colaram <i>microtags</i> em formigas vivas para estudar o seu comportamento.[6]	9
2.5	Configuração de uma <i>tag</i> passiva. [3]	10
2.6	Descrição esquemática de uma <i>tag</i> passiva simples de RFID.[3]	10
2.7	Configuração de uma <i>tag</i> semi-passiva.[3]	11
2.8	Descrição esquemática de uma <i>tag</i> semi-passiva simples de RFID. [3]	11
2.9	Configuração de uma <i>tag</i> activa. [3]	12
2.10	Descrição esquemática de uma <i>tag</i> activa simples de RFID. [3]	12
2.11	Diferentes formas de transferência de energia e informação em Sistemas.RFID [11]	13
2.12	Espectro eletromagnético para sistemas RFID [13]	14
2.13	Frequências RFID UHF no Mundo. [14]	16
3.1	Arquitetura de um Recetor Homodino. [25]	23
3.2	Arquitetura de um Recetor Heterodino. [25]	24
3.3	Diagrama de Blocos do <i>Front End</i>	25
3.4	Diagrama de blocos interno do Desmodulador IQ LT5575. [27]	26
3.5	Diagrama de blocos interno da PLL ADF4351.[28]	27
3.6	Placa de desenvolvimento baseada no ADF4351.	28
3.7	Espectro obtido na placa de desenvolvimento para os 866.5 MHz.	28
3.8	Espectro obtido na placa de desenvolvimento para os 915 MHz.	29
3.9	Diagrama de Blocos Interno do Modulador IQ LT5568 [29]	30
4.1	Antena em <i>loop</i> . [34]	33
4.2	<i>Horn</i> antena. [35]	34
4.3	Antena <i>patch</i>	34
4.4	Diagrama de Radiação.[3]	35
4.5	Diagrama de radiação isotrópico.	35
4.6	Diagrama de radiação omnidirecional. [2]	36
4.7	Diagrama de radiação direcional.	36
4.8	Polarização linear, elíptica e circular. [37]	38
4.9	Polarização elíptica.[36]	39

4.10	Várias formas do elemento radiante (<i>patch</i>). [36]	39
4.11	Parâmetros físicos de uma antena <i>microstrip</i> e suas linhas de campo.	40
4.12	Alimentação por Linha de Transmissão. [36]	42
4.13	Circuito Equivalente à Linha de Transmissão. [36]	42
4.14	Alimentação por Cabo Coaxial. [36]	43
4.15	Alimentação por Fenda. [36]	44
4.16	Circuito Equivalente à Alimentação por Fenda. [36]	44
4.17	Alimentação por Acoplamento de Aproximação. [36]	44
4.18	Circuito Equivalente à Alimentação por Acoplamento de Aproximação. [36]	45
4.19	Técnicas de polarização circular.[39]	45
4.20	Polarização circular com alimentação dupla.[39]	46
4.21	Configuração proposta para a antena. Do lado esquerdo temos uma vista lateral e do lado direito vista de cima.	47
4.22	<i>Patch</i> principal.	48
4.23	<i>Patch</i> parasita.	49
4.24	Configuração 3D proposta da antena de diferentes ângulos.	49
4.25	Gráfico dos valores do S_{11} simulados.	50
4.26	Diagrama de radiação para 915 MHz do ganho da antena.	50
4.27	Diagrama de radiação 2D do ganho da antena.	51
4.28	<i>Axial Ratio</i> da antena simulada para 915 MHz.	51
4.29	Gráfico da parte real da impedância de entrada simulada.	52
4.30	Gráfico da parte imaginária da impedância de entrada simulada.	52
4.31	Comparação do S_{11} da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	53
4.32	Comparação do diagrama de radiação da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	53
4.33	Comparação da polarização esquerda e direita obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	54
4.34	<i>Axial ratio</i> medido na antena.	54
4.35	Configuração proposta para a antena. Do lado esquerdo temos uma vista lateral e do lado direito vista de cima.	56
4.36	<i>Patch</i> parasita.	57
4.37	<i>Patch</i> principal.	58
4.38	Configuração 3D proposta da antena de diferentes ângulos.	58
4.39	Gráfico dos valores do S_{11} simulados.	59
4.40	Diagrama de radiação para 866.5 MHz do ganho da antena.	59
4.41	Diagrama de radiação 2D do ganho da antena.	60
4.42	<i>Axial ratio</i> da antena simulado para 866.5 MHz.	60
4.43	Gráfico da parte real da impedância de entrada simulada.	61
4.44	Gráfico da parte imaginária da impedância de entrada simulada.	61
4.45	Comparação do S_{11} da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	62
4.46	Comparação do diagrama de radiação da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	62
4.47	Comparação da polarização esquerda e direita obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.	63
4.48	<i>Axial ratio</i> medido na antena.	63

5.1	Constituição de uma Etiqueta RFID [48]	67
5.2	Máquina de Corte por Rolo [2]	68
5.3	Sistema de serigrafia, para impressão de antenas RFID [49]	69
5.4	Constituição de <i>tag</i> RFID UHF. [51]	70
5.5	Fonte de tensão com resistência da fonte R_S e resistência da carga R_L	71
5.6	Impedância complexa da antena conectada á impedância complexa do IC. . .	72
5.7	<i>Matching</i> de impedâncias entre a antena e o IC.	73
6.1	Layout e o resultado da impressão da tag 1.	76
6.2	Simulação do diagrama de radiação da Tag 1 e a tabela de S_{11}	76
6.3	Layout e o resultado da impressão da tag 2.	77
6.4	Simulação do diagrama de radiação da Tag 2 e a tabela de S_{11}	77
6.5	Layout e o resultado da impressão da tag 3.	78
6.6	Simulação do diagrama de radiação da Tag 3 e a tabela de S_{11}	78
6.7	Layout e o resultado da impressão da tag 4.	79
6.8	Simulação do diagrama de radiação da Tag 4 e a tabela de S_{11}	79
6.9	Layout e o resultado da impressão da tag 5.	80
6.10	Simulação do diagrama de radiação da Tag 5 e a tabela de S_{11}	80
6.11	Layout e o resultado da impressão da tag kittytag.	81
6.12	Layout e o resultado da impressão da tag letras.	81
B.1	Esquema elétrico da placa do Desmodulador IQ LT5575.	93
B.2	<i>Layout</i> da camada superior da placa do Desmodulador IQ LT5575.	94
B.3	Fotografia da camada superior da placa do Desmodulador IQ LT5575.	94
B.4	Esquema elétrico da placa do Sintetizador de RF ADF4351.	95
B.5	<i>Layout</i> da placa do Sintetizador de RF ADF4351.	96
B.6	Fotografia da camada superior da placa do Sintetizador de RF ADF4351. . .	96
B.7	Esquema elétrico da placa do Modulador IQ LT5568.	97
B.8	<i>Layout</i> da placa do Modulador IQ LT5568.	97
B.9	Fotografia da camada superior da placa do Modulador IQ LT5568.	98
B.10	Esquema elétrico da placa para os filtros B3717 e B3588.	98
B.11	<i>Layout</i> da placa para os filtros B3717 e B3588.	99
B.12	Fotografia da camada superior da placa do filtro B3717.	99
B.13	Esquema elétrico da placa para o Amplificador de Potência SKY65111.	100
B.14	<i>Layout</i> da placa para Amplificador de Potência SKY65111.	101
B.15	Esquema elétrico da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864.	102
B.16	<i>Layout</i> da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864.	103
B.17	Fotografia da camada superior da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864. .	103
B.18	Esquema elétrico da placa do Programador auxiliar do sintetizador baseado no PIC18LF2550.	104
B.19	<i>Layout</i> da placa de programação baseada no PIC18LF2550.	105
B.20	Fotografia da camada superior da placa de programação baseada no PIC18LF2550.	105
B.21	Fotografia da camada inferior da placa de programação baseada no PIC18LF2550.	105
C.1	Fotografia frontal da antena RFID para a banda americana.	106
C.2	Fotografia lateral da antena RFID para a banda americana.	107
C.3	Fotografia frontal da antena RFID para a banda europeia.	107

C.4	Fotografia lateral da antena RFID para a banda europeia.	108
-----	--	-----

Lista de Tabelas

2.1	Cronologia dos acontecimentos históricos responsáveis pelo aparecimento da tecnologia RFID. [3]	7
2.2	Principais características dos sistemas RFID nas diferentes frequências de operação.	15
2.3	Bandas de Frequências e Potências atribuídas para os Sistemas RFID UHF em todo Mundo. [15]	16
2.4	Classificações das <i>tags</i> reconhecidas pela EPCglobal.	17
2.5	Características do protocolo EPC Generation-2 Class 1.	19
2.6	<i>International Standards Organization (ISO) 1800 Series – Air interface for item management.</i> [19]	20
2.7	Leitores RFID UHF comerciais.	21
2.8	Antenas RFID UHF comerciais.	21
2.9	<i>Tags</i> RFID UHF comerciais.	22
4.1	Parâmetros e dimensões da antena.	48
4.2	Parâmetros e dimensões da antena.	57
6.1	Dimensões dos Parâmetros da Tag 1.	76
6.2	Dimensões dos Parâmetros da Tag 2.	77
6.3	Dimensões dos Parâmetros da Tag 3.	78
6.4	Dimensões dos Parâmetros da Tag 4.	78
6.5	Dimensões dos Parâmetros da Tag 5.	79
6.6	Distâncias de leitura obtida nas tags.	82
B.1	Preço dos componentes da PCB do desmodulador IQ LT5575.	92
B.2	Preço dos componentes da PCB do sintetizador de RF ADF4351.	94
B.3	Preço dos componentes da PCB do modulador IQ LT5568.	96
B.4	Preço dos componentes da PCB do filtro B3717 ou B3588.	98
B.5	Preço dos componentes da PCB do amplificador de potência.	99
B.6	Preço dos componentes da PCB da ADC e DAC.	101
B.7	Preço dos componentes da PCB do programador auxiliar do sintetizador, PIC18LF2550.	103

Lista de Acrónimos

ADC	Analog-To-Digital Converter
AR	Axial Ratio
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
DAC	Digital-To-Analog Converter
DC	Direct current
DOD	Drop-On-Demand
DSP	Digital Signal Processor
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EPC	Electronic Product Code
ERP	Effective Radiated Power
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency-Division Duplex
FPGA	Field Programmable Gate Array
HF	High Frequency
IC	Integrated Circuit
IF	Intermediate Frequency
IQ	In Phase and Quadrature
ISO	International Standards Organization
LF	High Frequency
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
PLL	Phase Locked Loop
QFN	Quad-Flat No-Leads
RADAR	Radio Detection And Ranging
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
SAW	Surface Acoustic Wave

TDD	Time-Division Duplex
UHF	Ultra High Frequency
UID	Unique Identification Number
VCO	Voltage-Controlled Oscillator

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A tecnologia de identificação por radiofrequência (do inglês, Radio Frequency IDentification - RFID) é um sistema automático que permite, captar, identificar, como o próprio nome indica, e localizar dados usando sinais de radiofrequência como via de comunicação. Além disso, quando ligada a bases de dados e a redes de comunicações como a internet, esta tecnologia proporciona um poderoso sistema de controlo e gestão em qualquer ambiente, permitindo que qualquer pessoa, animal ou produto seja identificado, quantificado e localizado fácil e eficazmente, e em tempo real. De uma forma conceptual, um sistema RFID é uma tecnologia sem fios onde ondas de rádio são transmitidas por um leitor, através de uma antena a um identificador (etiqueta ou, do inglês, *tag*). Esta etiqueta atribui a um objeto uma identidade única, o chamado código de identificação único (do inglês, Unique Identification Number - UID). Muitas são as áreas onde esta tecnologia pode ser aplicada, sendo que as mais interessantes passam pela saúde, defesa, agricultura, ambiente, retalho; havendo também um grande foco nos sistemas de internet das coisas (do inglês: *Internet of things*). No negócio da logística e distribuição, por exemplo, os custos associados aos atuais e ineficientes sistemas de gestão de stocks são consideráveis. A aplicação de sistemas de RFID na gestão de stocks apresenta inúmeras vantagens e é capaz de resolver eficaz e significativamente as atuais limitações dos sistemas convencionais. Esta tecnologia possibilita o *tracking* de todo o inventário de uma loja/mercado de forma precisa e em tempo real, reduzindo assim o tempo e a mão-de-obra necessários para a sua gestão e, mais importante ainda, garantindo uma gestão eficiente. A Figura 1.1 apresenta um esquema do fluxo de gestão de stocks com sistema de RFID na área do retalho, enumerando as vantagens da aplicação da tecnologia RFID.

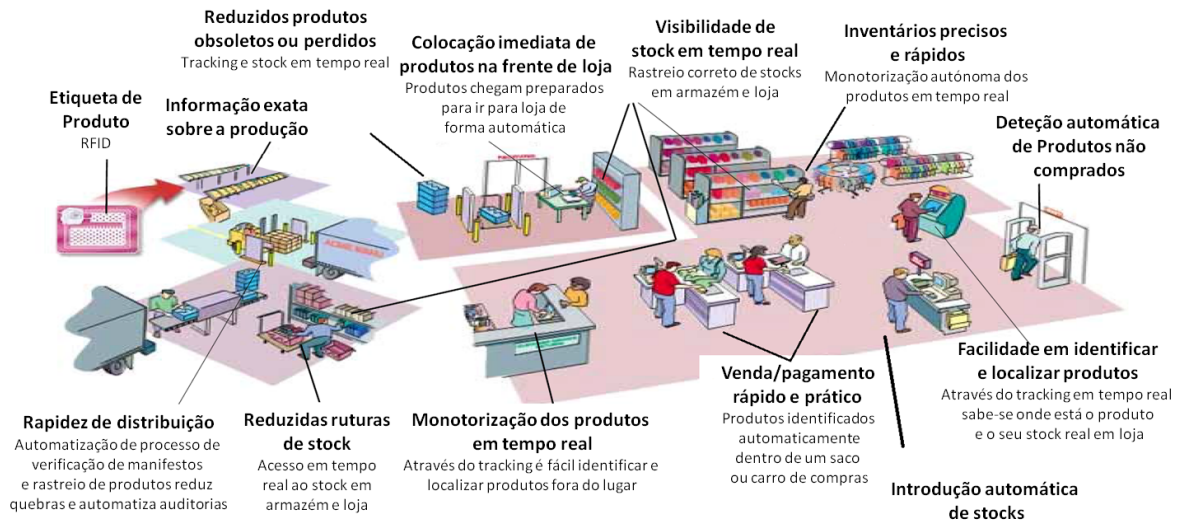


Figura 1.1: Fluxo de gestão de stocks com sistema de RFID na área do retalho.

Não só na área do retalho, mas também em todas as áreas atrás inumeradas, o interesse pela tecnologia RFID em sistemas de monitorização tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, por permitir, de uma forma fiável, a identificação e localização de objetos, animais ou pessoas, em tempo-real. De acordo com novos dados produzidos pela empresa de pesquisa de mercado IDTechEx, em todo o mundo, o mercado total de bens e serviços de RFID, incluindo as *tags*, leitores e software/serviços, subirá para 10,1 mil milhões de dólares, já este ano de 2015, e é estimado atingir os 30,24 mil milhões até 2024.[1] No entanto, na Europa e, em particular em Portugal, é ainda uma tecnologia pouco usada, um pouco devido aos custos associados, mas também pela falta de conhecimento da tecnologia envolvida.

No entanto, esta tecnologia apresenta ainda consideráveis limitações, que inviabilizam o seu uso quer no grande mercado quer no mais pequeno, mas também em ambientes de Investigação&Desenvolvimento (I&D). Entre as limitações mais importantes encontram-se as seguintes:

- Os leitores comerciais por norma têm preços muito elevados, sendo muitos deles baseados em *transceivers* RFID, logo monopolizados por grandes empresas; não são atualizáveis a novos protocolos de comunicação, a novas *tags* (etiquetas) ou até mesmo a mudanças de frequência, apresentando-se aqui como uma significativa limitação em termos de adaptabilidade;
- Custo elevado de todo o sistema causado, não só pelo preço dos leitores e antenas, mas também pelo processo de impressão das *tags* e à baixa concorrência no mercado. As atuais impressoras de tags, têm um valor demasiado elevado para que possa ser considerado como um investimento lucrativo por parte das empresas consumidoras desta tecnologia, obrigando, por isso, à compra de novas *tags* a uma empresa fornecedora.

As tecnologias utilizadas no desenvolvimento do novo sistema RFID não são novas, elas já

existem no mercado. Assim sendo, a inovação deste projeto não está relacionada com novos componentes ou novos consumíveis mas, em vez disso, com novos métodos de produção e desenvolvimento de leitores RFID reconfiguráveis e de *tags* RFID. Este sistema foi desenvolvido para funcionar na banda Americana e na banda Europeia.

1.2 Objetivos

Este projeto apresenta três objetivos principais:

Dimensionar um *Front End* de radiofrequência (RF) para a construção de um leitor RFID. Pretende-se que estes novos leitores RFID consistam num sistema RFID UHF (do inglês: Ultra High Frequency) low cost reconfigurável; sejam baseados em circuitos programáveis, como DSP (do inglês: Digital Signal Processor) e os designados "Field-Programmable Gate Array" (FPGA) - com processador embutido e software defined radio; não dependam de *transceivers* RFID comerciais; e que sejam totalmente reconfiguráveis não só em termos de novos protocolos como para diferentes frequências.

Estudar e dimensionar duas antenas *microstrip* com boas características para a banda RFID UHF europeia e americana. O crescente interesse nos sistemas RFID, torna interessante e aliciante o estudo e desenvolvimento de novos designs e tipos de antena de forma a ter uma boa performance e preço reduzido com possibilidade de produção em massa.

Desenvolvimento de *tags* passivas, em material orgânico e flexível como é o caso do papel, e um processo low cost de produção das mesmas. Pretende-se alterar uma impressora convencional, comercialmente disponível, para impressão de tags, *tags* estas desenhadas para ter a melhor performance possível. A nossa tecnologia permitirá assim que as *tags* sejam impressas em impressoras convencionais oferecendo independência às empresas consumidoras na produção das mesmas, podendo mesmo ser utilizada em ambientes de I&D, em Universidades ou Escolas.

1.3 Organização do Documento

Este documento apresenta nove Capítulos (incluindo este Capítulo Introdutório) e um Anexo:

Capítulo 2 - RFID - Este capítulo contém uma explicação mais detalhada sobre a tecnologia RFID, a aplicabilidade da tecnologia, as frequências de operação e os protocolos de comunicação, assim como as soluções comerciais existentes.

Capítulo 3 - RFID *Front End* - Apresentação e breve resumo das arquitetura de transmissão e receção dos sistemas de rádio. Exposição e descrição dos detalhes concretos da implementação do *front end* de rádio desenvolvido, sendo também apresentados os resultados relevantes.

Capítulo 4 - Antenas RFID - Apresentação teórica dos parâmetros das antenas, dando uma especial atenção às antenas *microstrip*. Exposição e descrição dos detalhes concretos da

simulação e implementação física de duas antenas para a banda de frequência RFID UHF europeia e americana, sendo também apresentados os resultados relevantes.

Capítulo 5 - *Tags* RFID UHF - Apresentação sobre os desafios do design das *tags* RFID UHF passivas, assim como a importância do custo das mesmas. É também feita uma explicação sobre os substratos, dando relevância a substratos flexíveis e orgânicos, como é o caso daqueles à base de papel. São descritas algumas técnicas de fabricação, salientando-se a tecnologia de impressão jato de tinta implementada neste projeto, assim como a caracterização da tinta condutora criada, baseada em nano partículas de prata, dando ênfase à importância desta tecnologia como sendo de fabricação rápida, simples e barata.

Capítulo 6 - Implementação de *tags* RFID UHF - Exposição e descrição dos detalhes concretos da simulação e implementação física de sete *tags* RFID para a banda de frequência RFID UHF europeia e americana, sendo também apresentados os resultados relevantes.

Capítulo 7 - Conclusões - Apresentação das conclusões do trabalho e indicação algumas propostas para trabalho futuro.

Além dos capítulos apresentados foram também elaborados os seguintes anexos onde pode ser encontrada informação complementar:

Anexo A - É apresentado o artigo (*Assessing the performance of inkjet-printed coils on paper substrate for WPT*) submetido na 1ª Conferência URSI AT-RASC (*Atlantic Radio Science Conference*) em 2015.

Anexo B - Contém o preço dos componentes, os esquemáticos, os *layouts* e as fotografia das placas de circuito impresso desenvolvidas nos principais blocos do *Front End* de RF.

Anexo C - Contém as fotografia das antenas desenvolvidas para as bandas de frequência RFID UHF americana e europeia.

1.4 Contribuições originais desta dissertação

Foram submetidos os seguintes artigos, na sequência da realização desta dissertação:

Hugo Miranda, Rómulo Antão, Hélder Machado, Ana Rita Ferreira, João Nuno Matos, Rui Escadas; *Assessing the performance of inkjet-printed coils on paper substrate for WPT*, URSI AT-RASC (Atlantic Radio Science Conference), 2015.

Hugo Miranda, João Nuno Matos; *UHF passive tags inkjet-printed on paper substrate*; processo de submissão.

Capítulo 2

RFID

2.1 A História

A história da tecnologia de identificação por radiofrequência (do inglês, Radio Frequency Identification (RFID)) data da década de 30. No entanto, a sua tecnologia subjacente surgiu já em 1897, quando Guglielmo Marconi inventou o rádio. O sistema de RFID aplica os mesmos princípios da física que os sistemas usados na radiodifusão, nos quais ondas de rádio, uma forma de energia eletromagnética, transmitem e recebem vários tipos de dados. Embora a tecnologia de RFID seja usada há décadas, só recentemente ficou popular, devido não só à diminuição do custo de produção mas também ao aumento da sua aplicabilidade em diversos domínios, fazendo crescer desta forma o interesse industrial e económico pelo uso desta tecnologia.

Foi no início do século XX, em 1906, que o engenheiro sueco Ernst Alexanderson [2] conseguiu gerar a primeira onda de rádio contínua, permitindo assim que todos os aspetos das ondas possam ser controlados. Isto marcou o início da comunicação por transmissão de sinais rádio. Foi também na primeira metade do mesmo século que se deu o aparecimento do primeiro sistema de Detecção e Telemetria por Rádio (do inglês, *Radio Detection and Ranging*, o tão bem conhecido RADAR). O radar envia uma onda de rádio para detetar e localizar um objeto através da reflexão dessa mesma onda. Esta reflexão permite determinar a posição e a velocidade do objeto. Embora tenha surgido antes foi somente durante a Segunda Guerra Mundial que se verificaram os maiores desenvolvimentos e melhoramentos desta tecnologia, através do projeto Manhattan. A potencialidade do radar foi rapidamente compreendida pelos militares que apostaram fortemente no seu desenvolvimento, tendo muitos deles sido mantidos em sigilo inicialmente.

Na Segunda Guerra Mundial, os alemães, os japoneses, os americanos e os ingleses utilizavam radares para alertar sobre a aproximação de aviões, mesmo enquanto ainda se encontravam a quilómetros de distância. No entanto, estes sistemas apresentavam ainda um problema, que se prendia com a impossibilidade de identificar quais desses aviões pertenciam ao inimigo e quais pertenciam aos aliados. Foi então que a força aérea alemã, a *Luffwaffe*, resolveu este problema utilizando inicialmente uma manobra simples: fazerem os aviões girarem sobre si mesmos. Durante os combates aéreos dos alemães contra os britânicos, estes observaram isso mesmo, que, sem motivo aparente e de forma repetida, os aviões inimigos giravam em torno

de si mesmos. Esse comportamento curioso foi relacionado com a interceção dos sinais de rádio da terra. Mais tarde, tornou-se evidente que os pilotos da *Luffwaffe*, giravam os aviões a fim de alterarem o *backscatter* do sinal refletido nos seus aviões, de cada vez que recebiam indicação de que estavam a ser detetados através do seu radar (Figura 2.1). A consequente modulação do blip (intensificação do ponto do radar) na tela do radar, permitiu assim aos técnicos saber se se tratava de um avião alemão ou não. Este é o primeiro sistema RFID passivo conhecido. Esta designação de "passivo" deve-se ao facto de não existir um transmissor de rádio alimentado no objeto a ser identificado. Consequentemente, o sinal usado para comunicar é o sinal de rádio transmitido pela estação de radar e devolvido pelo objeto a ser identificado, neste caso o avião. [3]

Foram os britânicos que mais tarde desenvolveram o primeiro identificador ativo para identificar aliados e inimigos. Foi colocado um transmissor em cada avião britânico e quando estes recebiam sinais das estações de radar a partir do solo, o tal dispositivo começava a transmitir um sinal que identificava o avião como amigável. E é este o conceito básico de um sistema RFID: um sinal é enviado a um transponder, que recebe e reflete de volta um sinal (passivo) ou transmite um sinal (ativo).

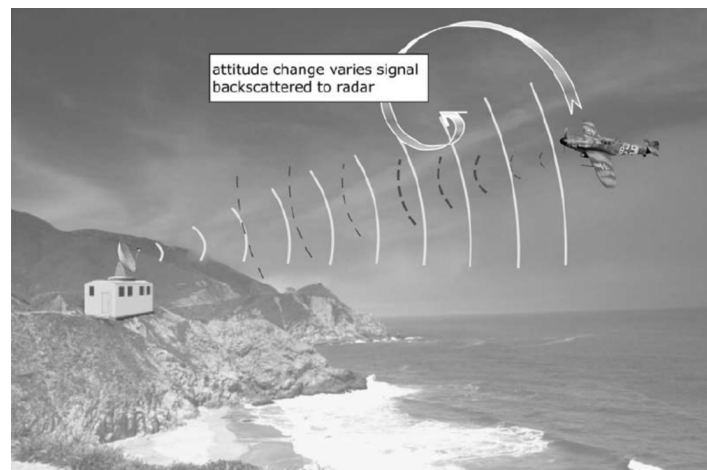


Figura 2.1: Uso de radiação *backscattered* para comunicar com um operador de radar.[3]

Na década de 70, o Laboratório Nacional de Los Alamos, nos Estados Unidos América, foi solicitado pelo Departamento de Energia para desenvolver um sistema de *tracking* de matérias nucleares.[4] Foi a partir daqui que se deu a explosão do desenvolvimento de sistemas RFID, implementando-se assim esta tecnologia no tracking de animais, veículos e automação em fábricas.[5]

A década de 80 tornou-se assim a década da plena implementação da tecnologia nos planos industriais e comerciais em todo o mundo, sendo o desenvolvimento do computador pessoal, um acontecimento chave para a expansão das aplicações RFID.

A década de 90 foi a que mais significado teve para a tecnologia de RFID, uma vez que foi durante esta década que foram implementadas as primeiras normas destes sistemas. A sua

explosão em termos de implementação deu-se na última década, tornando a sua entrada nas nossas vidas um acontecimento quase inevitável. Hoje em dia, esta tecnologia é de extrema importância, havendo cada vez mais *tags* (em português, etiquetas) à nossa volta. Na Tabela 2.1 é possível ver um resumo dos acontecimentos históricos que determinaram a evolução da tecnologia de RFID.

Década	Evento
1940–1950	Aperfeiçoamento do radar e a sua aplicação na Segunda Grande Guerra Mundial. RFID inventado em 1948.
1950–1960	Primeiras explorações da tecnologia RFID, experiências de laboratório.
1960–1970	Desenvolvimento da teoria da RFID. Início de testes de campo.
1970–1980	Explosão do desenvolvimento RFID. Aceleração dos testes de RFID. Muitas implementações RFID.
1980–1990	Entrada na linha da frente as aplicações RFID.
1990–2000	Aparecimento de normas. RFID é largamente utilizada. RFID torna-se parte do quotidiano das pessoas.
2000–	A Explosão RFID continua...

Tabela 2.1: Cronologia dos acontecimentos históricos responsáveis pelo aparecimento da tecnologia RFID. [3]

2.2 Constituição dos Sistemas RFID

Um sistema RFID é uma tecnologia sem fios que utiliza ondas de rádio na comunicação entre um leitor e um identificador. É constituído por dois blocos principais: o bloco constituído pelo leitor, que funciona como interrogador e recetor, e o bloco de identificação. Do primeiro bloco fazem parte duas componentes principais: o leitor RFID e a antena. O segundo é constituído pela etiqueta (ou *tag*) que atribui ao objeto uma identidade única. A Figura 2.2, descreve um sistema RFID com os principais blocos constituintes.

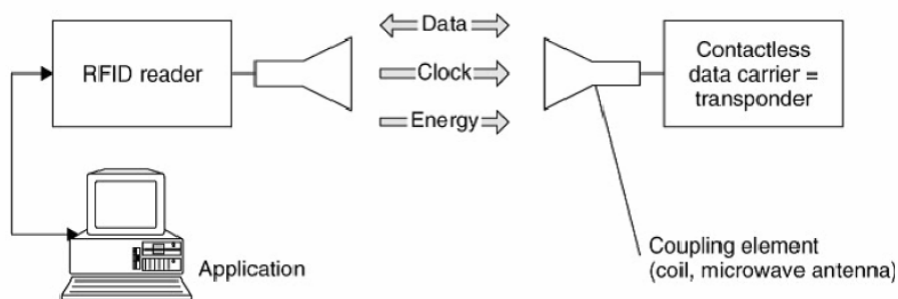


Figura 2.2: Diagrama de um sistema de RFID. [2]

De forma conceitual, o leitor RFID é responsável por transmitir um sinal de rádio através da antena para a *tag*, e esta responde emitindo para o leitor RFID o seu UID.

2.2.1 Leitor e Antena RFID

Num ambiente RFID, a antena do leitor é responsável por emitir um sinal de rádio para a tag, fazendo com que esta seja ativada (escrita ou leitura, dependendo do ambiente de aplicação).

Os tipos de leitores tendem a ter características ditadas pelas *tags*, com as quais devem ser compatíveis, e pelas funcionalidades impostas pelo sistema de informação. O leitor em geral é constituído por dois blocos: o bloco do *front end* de rádio frequência, que é responsável por tratar dos sinais analógicos emitidos e recebidos pela antena; e o bloco banda base, responsável pela parte digital, protocolos, controlo e comunicações com terminais. O *front end* de rádio está então ligado ao hardware digital, ou seja, ao bloco banda base.

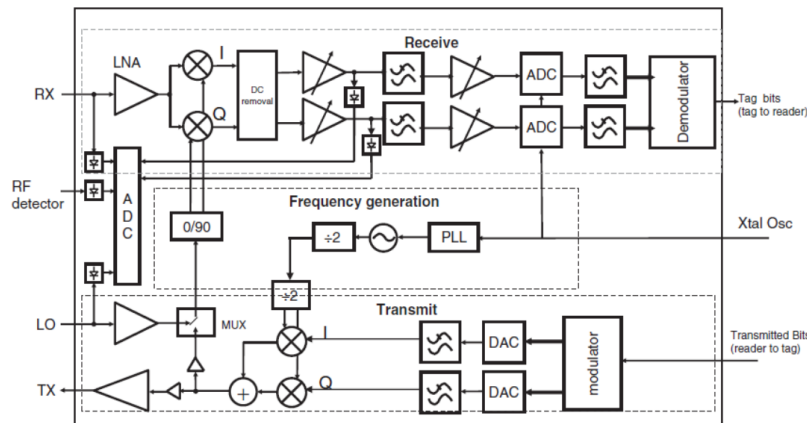


Figura 2.3: Possível arquitetura de rádio *transceiver* para leitor RFID.[6]

O sucesso de leitura pode depender de diversos fatores: posição da tag relativamente à antena, compatibilidade entre ambas as partes (exemplo da frequência de funcionamento) e interferências eletromagnéticas.

Como é sabido, as ondas eletromagnéticas resultam das combinações de campos elétricos com campos magnéticos que em propagação em espaço livre formam um ângulo de 90° entre si. Estas ondas eletromagnéticas têm direções de propagação que são determinadas pela antena. Por esta razão, quanto mais alinhada estiver a tag com a direção de radiação e polarização da antena, maior será a tensão induzida no seu circuito e, consequentemente, melhor será a sua leitura. Este aspeto é muito importante nas aplicações RFID, pois as *tags* passivas têm de ser alimentadas remotamente pela radiação incidente a partir do leitor. A quantidade de energia que a tag pode recuperar, a partir do leitor para que funcione, depende da forma como a energia é transferida à distância.

Outra preocupação que devemos ter em relação à propagação do sinal são as particularidades do meio. Materiais refletivos no ambiente podem alterar substancialmente as distâncias de funcionamento dos sistemas RFID, as taxas de leitura e a precisão de localização. Dependendo da frequência de operação da tag, esta pode deixar de funcionar caso esteja próxima de uma superfície metálica, por exemplo. Isto acontece porque entre a antena da tag e o material ocorre uma degradação do sinal, que reduz substancialmente a potência de acoplamento na

etiqueta.

A água, quando presente no ambiente, pode também condicionar a comunicação do sinal. Se a antena de uma *tag* estiver suficientemente próxima da água ou mesmo em contacto com ela, a energia que a *tag* vai receber ficará comprometida, porque parte da energia será gasta na excitação das moléculas da água. Desta forma, a capacidade de absorção de energia eletromagnética por parte da antena baixará. Um exemplo simples deste efeito é o funcionamento de um forno micro-ondas. O aquecimento através de micro-ondas, acontece devido à excitação de moléculas de água presentes nos alimentos [7], ou seja as moléculas de água absorvem a energia do micro-ondas, comportando-se assim como pequenas antenas.

2.2.2 *Tags* RFID

O transponder (etiqueta ou *tag*) é o dispositivo que funciona como identificador do objeto. É essencialmente caracterizado pelo chip nele contido; pela forma de alimentação, pelas características da memória, e pela frequência com que opera.[8] No seu chip está contido um conjunto de dados relativos ao objeto que identifica. Quando solicitado pelo leitor, o transponder envia toda a informação contida na memória para o leitor.

Nos últimos anos, este dispositivo tem-se tornado alvo de grande desenvolvimento, visto que é o elemento principal da tecnologia RFID. Dois fatores que têm sido extremamente importantes na evolução das *tags* relacionam-se com o seu tamanho (cada vez mais reduzido) e com a diminuição do seu custo. Hoje em dia, são já produzidas *tags* menores que um milímetro, tornando possível a sua incorporação em qualquer objeto e, desta forma, o seu *tracking*, podendo garantir, por exemplo, a originalidade do produto. Um outro exemplo da aplicação destas microtags está na investigação do comportamento de seres vivos muito pequenos, como é o caso da formiga (Figura 2.4).



Figura 2.4: Investigadores britânicos colaram *microtags* em formigas vivas para estudar o seu comportamento.[6]

Existem atualmente três grupos de *tags*: As passivas, as semi-passivas e as ativas e são descritas em detalhe nas secções seguintes.

Passivas

Neste projeto deu-se mais ênfase às *tags* passivas, uma vez que são mais usadas, mais simples e baratas, consistem numa etiqueta com uma pequena antena conectada a um microchip (Figura 2.5 e 2.6). Esta *tag* é passiva visto não ter bateria, ou seja, não possui fonte de energia interna para o seu funcionamento. Em vez disso, usa a energia eletromagnética radiada pelo leitor, convertendo-a para DC (energia de funcionamento do microchip). A *tag* transmite então a informação do leitor, por backscatter [3], quanto à energia que recebe. Uma vez que não possui bateria, e sendo os seus circuitos mais simples e pequenos (podendo a *tag* ter apenas milímetros), este tipo de *tag* possui teoricamente uma vida útil ilimitada, podendo suportar condições extremas, sem nunca comprometer o seu funcionamento. Visto que a *tag* passiva é geralmente mais pequena, simples de fabricar, mais resistente e de grande interesse comercial levou à sua produção em massa, tendo custos de produção muito baixos, podendo custar apenas alguns centimos.[3]

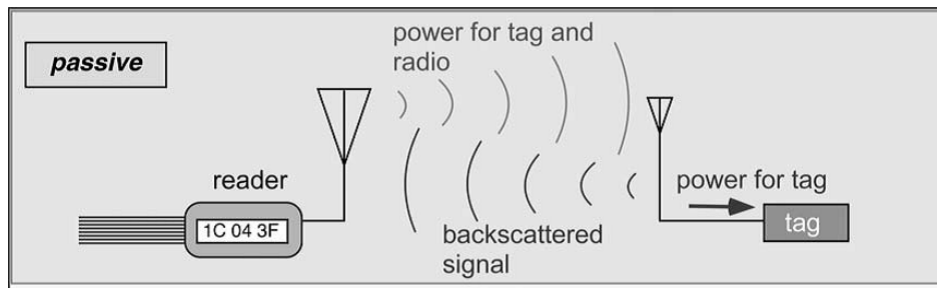


Figura 2.5: Configuração de uma *tag* passiva. [3]

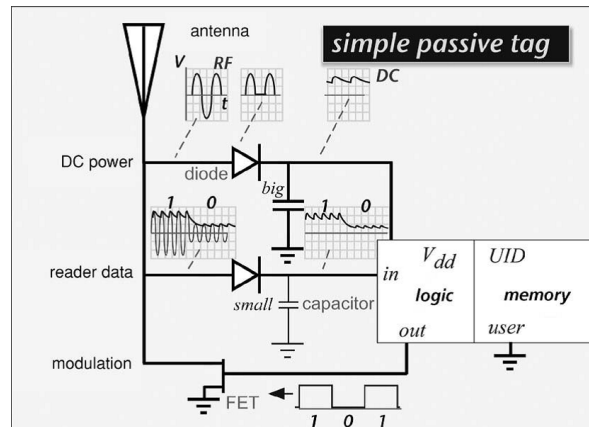


Figura 2.6: Descrição esquemática de uma *tag* passiva simples de RFID.[3]

Semi-passivas ou Semi-ativas

O funcionamento deste tipo de *tag* é, no fundo, uma espécie de meio-termo entre uma *tag* passiva e uma ativa. Apesar de esta possuir uma alimentação interna, ou seja, uma bateria, esta só serve para alimentar os circuitos internos e não para transmitir informação ao leitor (Figura 2.7 e 2.8). A grande diferença desta *tag* em relação à *tag* passiva é que a *tag*

semi-passiva pode conter um microchip de maiores dimensões e de maior capacidade, uma vez que tem uma alimentação interna. No entanto, o seu alcance máximo acaba por ficar comprometido, visto o seu funcionamento de transmissão ser similar ao da *tag* passiva.[9]

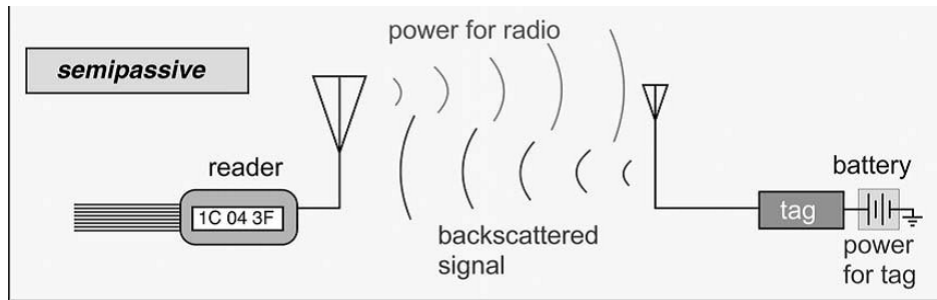


Figura 2.7: Configuração de uma *tag* semi-passiva.[3]

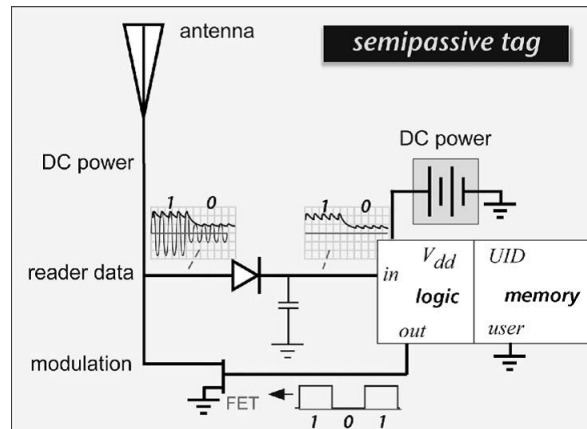


Figura 2.8: Descrição esquemática de uma *tag* semi-passiva simples de RFID. [3]

Activas

As *tags* ativas, ao contrário das *tags* passivas, têm uma alimentação interna para alimentar o processador, a memória e possivelmente os sensores (Figura 2.9 e 2.10) e, por isso, estão constantemente em funcionamento, quer estejam no campo de um leitor quer não. Uma vez que não são alimentadas pela energia emitida pelo leitor, o sinal da *tag* pode ser enviado ao leitor, onde quer que ele esteja, estando menos sujeitas a problemas de orientação com o leitor, como acontece nas passivas. Estas *tags* podem receber e armazenar informação e, além disso, podem ser lidas a uma distância maior que o RFID passivo. Estas *tags* apresentam também algumas desvantagens, nomeadamente, o facto de serem mais complexas a nível de lógica de controlo, serem maiores e mais pesadas devido à bateria, e serem muito mais caras relativamente às *tags* passivas. Todas as diferenças enumeradas têm grande impacto quer no raio de comunicação, quer na possibilidade de incluir sensores e registadores de dados, quer na capacidade de ler várias *tags* simultaneamente, quer em outros parâmetros funcionais. Por isso, todas elas são importantes e devem ser consideradas quando se pretende escolher o tipo

de *tag* que mais se adequa a determinada aplicação.[3]

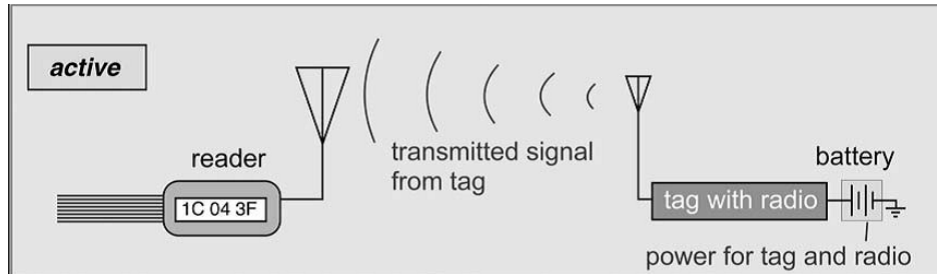


Figura 2.9: Configuração de uma *tag* activa. [3]

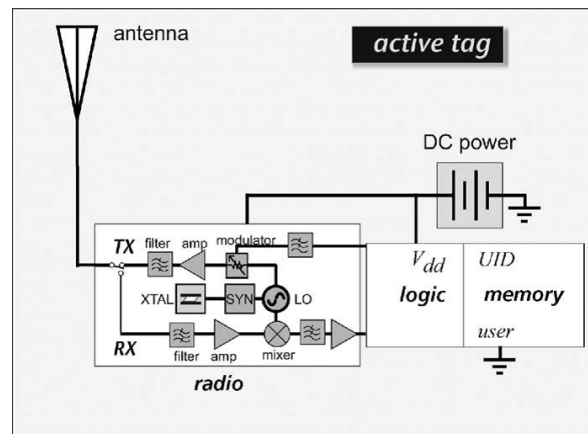


Figura 2.10: Descrição esquemática de uma *tag* activa simples de RFID. [3]

2.3 Aplicabilidade

Apesar de muitas vezes impercetível no nosso dia-a-dia, já são muitos os utilizadores que usam a tecnologia RFID em locais tão comuns como parques de estacionamento, aeroportos, escolas, universidades, bibliotecas, hospitais, fábricas, etc. A seguir são listados alguns exemplos onde esta tecnologia pode ser encontrar:

- Localização de carros [10];
- Retalho;
- Localização de pessoas em áreas de risco [10]
- Transportes públicos [10];
- Cenários de aplicação para telemóveis [10];
- Componentes de acompanhamento em Centros de Informática [10];
- Controle de contentores e produtos nas alfandegárias [10];
- Otimização da logística na indústria do vestuário [10];
- Identificação de animais; [11];
- Imobilização eletrónica; [11];

- Eventos desportivos; [11];
- Automação industrial; [11];
- Aplicações médicas e farmacêuticas; [11];
- Petróleo e Gás;
- Pecuária;
- Mineração e Siderurgia;
- Portagens;
- Eletrodomésticos.

Grandes empresas internacionais como a WalMart, Volkswagen, Jaguar, Metro Group, FedEx e a Google têm intensificado o uso dos sistemas de RFID na otimização de processos, tais como, gestão de stocks, pagamentos por telemóveis, controlo de acessibilidade, controlo de assiduidade, prevenção de roubo, monitorização de peças, contentores de cargas, etc.

2.4 Frequências de Operação

As *tags* respondem aos leitores RFID, através de ondas de rádio, que basicamente são ondas eletromagnéticas que usam parte das frequências da radiação eletromagnética, às quais chamamos espectro eletromagnético. A forma como o leitor RFID alimenta as *tags*, através de ondas de rádio, pode ser feito por acoplamento indutivo ou por radiação, como se pode ver na Figura 2.11.

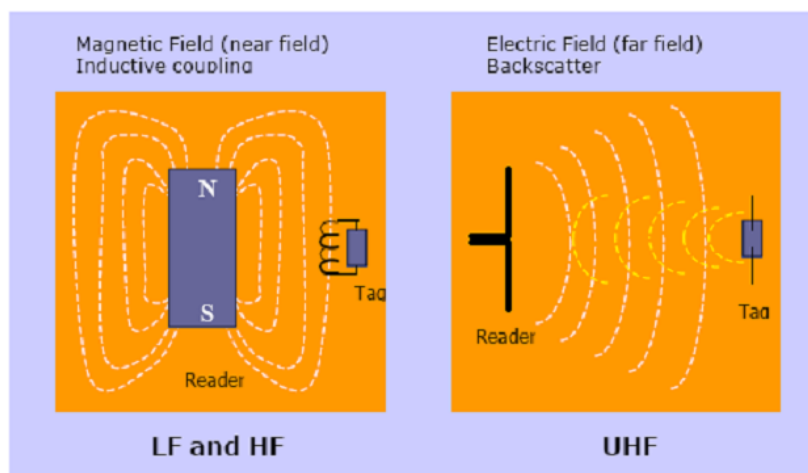


Figura 2.11: Diferentes formas de transferência de energia e informação em Sistemas.RFID [11]

O acoplamento indutivo é usado nas frequências abaixo dos 30 MHz, ou seja, nas frequências LF (do inglês, *Low Frequency*) e HF (do inglês, *High Frequency*). Um leitor através da sua antena, que é uma bobine, gera um campo magnético, designado em inglês, *near field*, para induzir uma tensão na bobine da *tag* [12], que faz carregar os condensadores no IC (do inglês, *Integrated Circuit*) da *tag*. Esta energia armazenada, vai alimentar o sistema de circuitos

lógicos e, conseqüentemente, transferir os dados para o leitor.

O acoplamento por radiação é usado para frequências acima dos 100 MHz. Neste caso, um leitor, através da sua antena, alimenta as *tags* através de um campo eletromagnético, em que a energia enviada é refletida e modelada pelo IC da *tag*.

O sistema de RFID utiliza uma pequena percentagem do espectro eletromagnético (Figura 2.12), havendo por isso uma grande disputa, ao nível empresarial, pelas frequências de funcionamento dos seus sistemas. A função de outros serviços de radiocomunicação não deve, em circunstância alguma, ser interrompida ou prejudicada pela operação de sistemas de RFID. Por esta razão, é de extrema importância assegurar que os sistemas de RFID não interfiram com rádios, televisão, ou serviços de rádio móvel (polícia, serviços de segurança, indústria, marinha, aeronáutica e telemóveis).[11] Devido à grande necessidade de cuidado e atenção em relação aos outros serviços de radiocomunicações, a gama de frequência de funcionamento dos sistemas de RFID, acaba por ficar significativamente restringida.

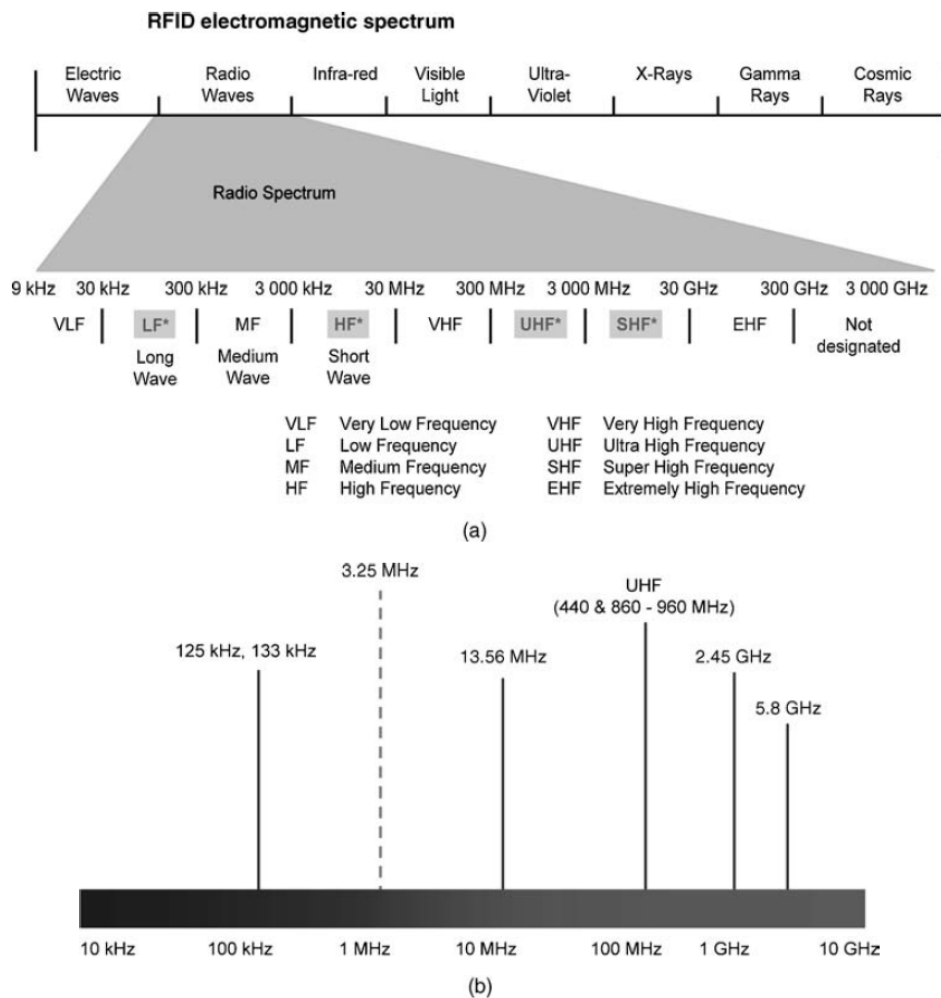


Figura 2.12: Espectro eletromagnético para sistemas RFID [13]

Quanto mais baixa a frequência de operação, melhor o desempenho quando próximo de superfícies metálicas mas menor a taxa de transmissão atingida. As *tags* que operam até 125 KHz são as menos suscetíveis a degradações de performance, mas por outro lado, têm um raio de leitura de menos de meio metro. Na faixa dos 13,56 MHz encontram-se as *tags* mais baratas e com um raio de leitura de até 1 metro, usados principalmente em cartões "inteligentes". Entre os 868 e 915 MHz encontram-se as etiquetas com potencial para serem as mais baratas, quando produzidas em larga escala. Costumam ser utilizadas em cobrança automatizada por permitirem leituras a mais de um metro de distância, porém alguns países proíbem ou restringem as transmissões nessa banda, por serem reservadas. *Tags* no campo das microondas permitem um sinal mais direcional e altas taxas de leitura, o que as torna ideais para certas aplicações. Por serem as mais suscetíveis a degradações devidas ao meio, o seu raio de leitura pode ficar reduzido. [8] Na Tabela 2.2 pode ser visto um resumo das principais características dos sistemas RFID que operam a diferentes frequências.

	LF	HF	UHF	Microwave
Gama de frequência	< 135 KHz	13.56 MHz	860-930 MHz	2.45 e 5,8 GHz
Raio de leitura típico	<0.5m	~1m	<9m	>10m
Fonte de energia da <i>tag</i>	Principalmente passiva, utilizando acoplamento indutivo (<i>near field</i>)	Principalmente passiva, utilizando acoplamento indutivo (<i>near field</i>)	Tags ativas e passivas, utilizado acoplamento por radiação (<i>far field</i>)	Tags ativas e passivas, utilizado acoplamento por radiação (<i>far field</i>)
Aplicações típicas	Controlo de Acesso; Identificação de animais; Imobilizadores de veículos.	Os cartões inteligentes; Controlo de acesso; Pagamento; Identificação; Bibliotecas; Transportes.	Cadeia de fornecimento; Marcação de caixas; Bagagem; Controlo em Hospitais.	Cobrança eletrônica de portagens; Localização das mercadorias em tempo real, como por exemplo contentores.
Vantagens	Menos suscetíveis à degradação de desempenho em metais e líquidos.	Melhor precisão e velocidade de leitura, pode conter mais informações.	Em quantidade, as <i>tags</i> UHF são mais baratas que as <i>tags</i> LF ou HF, devido aos avanços recentes no projeto do IC. Alcance de leitura elevado Leitura simultânea elevada.	Velocidades de leitura elevadas
Desvantagens	Curto alcance e baixa velocidade de leitura.	Requer maior potência	Mais afetadas por degradações de desempenho em metais e líquidos do que as LF e HF.	Muito suscetíveis à degradação de desempenho em metais e líquidos.

Tabela 2.2: Principais características dos sistemas RFID nas diferentes frequências de operação.

Embora a maioria das *tags* RFID HF de curto alcance não necessitem de qualquer licença, as leis e os regulamentos variam de país para país. Hoje em dia, a única banda de frequências globalmente aceite é 13,56 MHz. No caso do RFID UHF passivo, o problema é muito mais complexo, pois as frequências adotadas por uns países não são permitidas por outros, devido à sua proximidade com bandas já alocadas para outros dispositivos, como telemóveis ou alarmes. Na Figura 2.13 e na Tabela 2.3 podemos ver as frequências adotadas pelas varias regiões do mundo para a tecnologia RFID na banda UHF, assim como, a potência máxima de emissão.

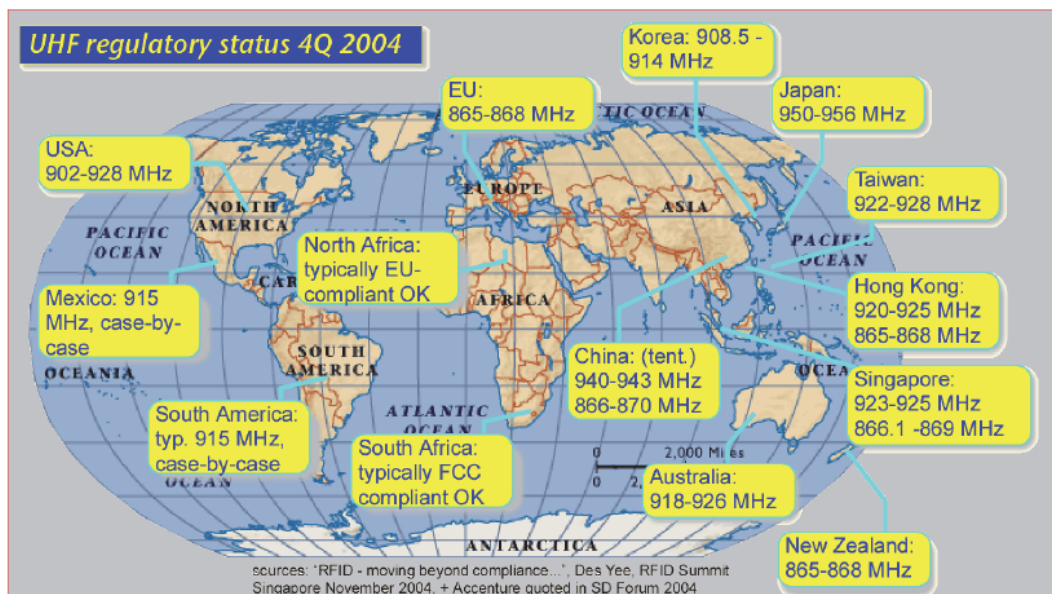


Figura 2.13: Frequências RFID UHF no Mundo. [14]

Área	Banda UHF associadas ao Sistema RFID	Potência Máxima de Emissão
Estados Unidos	902-928 MHz	4 W (EIRP)
Austrália	918-926 MHz	1 W (ERP)
Europa	865-868 MHz	2 W (ERP)
Hong Kong	865-868 MHz, 920-925 MHz	2 W (ERP), 4 W (EIRP)
Índia	865-867 MHz	4 W (EIRP)
Japão	950-956 MHz	4 W (EIRP)
Singapura	923-925 MHz	2 W (ERP)

Tabela 2.3: Bandas de Frequências e Potências atribuídas para os Sistemas RFID UHF em todo Mundo. [15]

2.5 Protocolos

Protocolo EPC Global

Devido às várias vertentes dos sistemas desenvolvidos e às diversas bandas de frequência usadas em todo o mundo, a criação de protocolos e normas de regulamentação dos sistemas RFID tornou-se inevitável. Apesar de certas aplicações de RFID precisarem de cooperar apenas com os procedimentos e sistemas numa única empresa, outros devem compartilhar informações com o consórcio global de parceiros, sendo o protocolo uma maneira de organizar a comunicação entre dispositivos, garantindo assim que a informação seja transmitida.

Ao longo dos anos tem sido feito um longo trabalho a fim de se desenvolverem padrões que possam ser adotados universalmente, sendo a EPCglobal[16] e a ISO[17] as organizações dominantes a nível de protocolos e normas neste sector.

A EPCglobal Inc., uma colaboração entre a GS1[18] e parceiros com a indústria, define um método combinado de classificar as *tags*, especificando as frequências, os métodos de acoplamento, os tipos de codificação e modulação, a capacidade de armazenamento de informações e os modos de interoperabilidade. Na Tabela 2.4 podemos ver as diferentes classificações das *tags* reconhecidas pela EPCglobal.[19]

Class	Descrição
Class 0	Passiva, só leitura.
Class 0+	Passiva, escrita uma vez, mas usa protocolos da Class 0.
Classe I	Passiva, escrita uma vez.
Classe II	Passivo,,escrita uma vez com extras, como a criptografia.
Classe III	Regravável semi-passivo (chip alimentado por bateria, comunicações alimentado pelo leitor), sensores integrados.
Class IV	Regravável, ativos, "two-way" <i>tags</i> que podem comunicar com outras <i>tags</i> alimentando as suas próprias comunicações.
Class V	Podem alimentar e ler Classe I, II, e III e ler <i>tags</i> de Classe IV e V, bem como operar como as da Classe IV

Tabela 2.4: Classificações das *tags* reconhecidas pela EPCglobal.

No caso do sistema tratado no presente trabalho, o protocolo define: uma interface aérea, que compreendendo o tipo de modulação, os sinais reconhecidos e a maneira como a informação é enviada; o controle de acesso ao meio, que define os dispositivos que podem transmitir a cada momento e como as colisões são resolvidas; e, por fim, as definições de dados, que englobam o tipo e o significado das informações associadas a cada *tag*.

EPC Generation-2 Class 1 UHF RFID

O protocolo EPC Generation-2 Class 1 foi o protocolo utilizado pelos IC das *tags* nesta dissertação. Este protocolo foi especialmente projetado para uso na indústria, em especial para a gestão da cadeia de abastecimento. A Tabela 2.5 mostra as características técnicas mais importantes do protocolo. [18]

A seguir são apresentadas algumas propriedades únicas do protocolo EPC Generation-2 Class 1 ou que foram especialmente introduzidas para satisfazer as necessidades da indústria.

- Operação na banda de frequências UHF - Maior alcance e melhor taxa de transmissão em relação a um protocolo de HF
- Camada física flexível - Protocolo pode ser usado em todo o mundo com diferentes regulamentações de Rádio (por exemplo CEPT na Europa e FCC nos EUA).
- Protocolo anti-colisão confiável - O leitor pode ler todas as *tags* de forma confiável, usando um protocolo probabilístico e por seleção de *tags* identificadas.
- Suporte para ambientes com muitos leitores RFID - Suporta os modos de sinalização em ambientes que contêm muitos leitores e muito ruído.
- Suporte para diferentes codificações e modulações - Uma adaptação ideal às mudanças ambientais e necessidades de aplicação.
- É possível bloquear a memória das *tags* - Leitores podem bloquear, bloquear permanentemente, ou desbloquear permanentemente blocos de memória de forma individual. Bloqueio e desbloqueio não autorizado é impedido, definindo por uma senha de acesso.
- Alta taxa de transmissão de dados - Preparado para ler até 1800 etiquetas por segundo em ambientes adequados, que é particularmente importante na indústria.
- Suporte para sessões - Etiquetas podem ser lidas simultaneamente por vários leitores e de forma independente (por exemplo, vários leitores numa só porta).
- É possível truncar EPC das *tags* - Os leitores podem ler apenas partes do EPC (por exemplo, apenas o número de série do EPC precisa ser lido se foram selecionados apenas os

objetos de um grupo em comum).

Frequência de Operação:	Banda UHF (860 MHz – 960 MHz).
Taxa Transmissão:	Ligação Leitor para <i>tag</i> : 25 – 160 kbps; Ligação backscatter: 10 – 640 kbps.
Codificação:	Ligação Leitor para <i>tag</i> : Pulse Interval Encoding (PIE); Ligação backscatter: FM0, Miller.
Modelação:	Ligação Leitor para <i>tag</i> : ASK ou BPSK; Ligação backscatter : ASK ou PSK backscatter.
Protocolo de Acesso Múltiplo:	Aloha.
Tags:	Passiva, 64/96 bit EPC, reservada e memória de utilizador.

Tabela 2.5: Características do protocolo EPC Generation-2 Class 1.

Protocolos ISO

Ao nível dos protocolos da ISO temos:

- ISO 11784 - estrutura de código;
- ISO 11785 - conceito técnico;
- ISO 14223 - *tags* avançadas;
- ISO 69873 - suportes de dados para ferramentas e dispositivos de fixação;
- ISO 10374 - identificação de contentores;
- Série ISO 18000.

A Tabela 2.6 apresenta os protocolos *ISO 1800 Series – Air interface for item management* (método de comunicação entre *tag* e leitor).

Standard	Title	Description
18000-1	Generic Parameters for the Air Interface for Globally Accepted Frequencies	Principles and architecture for an RFID standard
18000-2	Parameters for Air Interface Communications below 135 kHz	LF, two tag types, optional anti-collision Tag type A: FDX 125kHz Tag type B: HDX 134.2 kHz Passive, inductive coupling
18000-3	Parameters for Air Interface Communications at 13.56 MHz	HF, two modes (both require a license from the IP owner) Mode 1: 105.94kbps from tag to reader Mode 2: 423.75 kbps from tag to reader Passive, both use inductive coupling, FDX
18000-4	Parameters for Air Interface Communications at 2.45 GHz	Microwave, two modes Mode 1: Passive Mode 2: Semi-passive, tags talk first Passive, backscatter, HDX
18000-5	Withdrawn	Withdrawn (was for 5.8 GHz)
18000-6	Parameters for Air Interface Communications at 860 to 930 MHz	UHF, two tag types Type A: Pulse interval encoding, Aloha anti-collision Type B: Manchester encoding, Binary Tree anti-collision Passive, backscatter, HDX Reader to tag uses biphasic space encoding for both tag types (Type C: ISO may adopt EPC Gen2 as the type C tag in late 2005)
18000-7	Parameters for Air Interface Communications at 433 MHz	UHF, long range Read/write, active, HDX

Tabela 2.6: *ISO 1800 Series – Air interface for item management.*[19]

2.6 Soluções Comerciais

Existem alguns leitores RFID disponíveis comercialmente, mas são ainda muito caros, tendo preços que variam entre várias centenas e milhares de euros. Porém, muitos destes funcionam com *front end* baseados em IC *front end* RFID, que são IC que já têm a componente de rádio e a componente digital com todo o protocolo incorporado, como por exemplo

os das famílias AS399x da Austriamicrosystems[20] ou os R2000 da Impinj [21]. Na tabela são mostradas características de alguns leitores do mercado (Os valores não incluem portes de envio ou taxas alfandegárias).

Marca	Modelo	Frequências de Operação	Preço (euros)
Impinj	Speedway Revolution	EU ou USA	1505 [22]
ThingMagic	Vega	EU ou USA	865 [22]
	Mercury6	EU ou USA	1878 [22]
CAEN RFID	R4300P	EU e USA	2897 [23]
Motorola	FX9500	USA	1338 [23]
	FX7500	USA	863 [23]
Alien	ALR-9900	USA	1817 [23]
	ALR-9680	EU ou USA	786 [24]

Tabela 2.7: Leitores RFID UHF comerciais.

Mas para os leitores funcionarem precisam de antenas para transmitir os sinais eletromagnéticos. Na escolha das antenas RFID, muitas considerações devem ser tomadas, frequências de funcionamento, ganho, tamanho/volume e polarização. Na tabela seguinte mostra algumas antenas RFID comerciais (os valores não incluem portes de envio ou taxas alfandegárias).

Marca	Modelo	Frequências de Operação	Ganho	Polarização	Preço (euros)
ThingMagic	Astra External Antenna	856-956 MHz	6 dBiL	Circular	252 [22]
Times-7	A5531	EU ou USA	10 dBi	Linear	468 [22]
	A6031	EU ou USA	4 dBi	Circular	223 [22]
Impinj	UHF Threshold Antenna	EU	5 dBi	Linear	339 [22]
Alien	ALR-9608	USA	5.5 dBiC	Circular	171 [24]
Motorola	AN200	USA	6 dBiL	Circular	312 [23]
	AN720	USA	3 dBiL	Circular	173 [23]
CAEN RFID	WANTENNAX007	EU e USA	8 dBiL	Linear	301 [23]

Tabela 2.8: Antenas RFID UHF comerciais.

A escolha de *tags* pode variar muito, dependendo do tipo de utilização e tipo de alimentação. Como nesta dissertação vamos salientar as *tags* passivas de baixo custo, na Tabela 2.9 são apresentados alguns exemplos de labels RFID passivas (os valores não incluem portes de envio ou taxas alfandegárias. Os preços unitários são para quantidades de 1000 unidades).

Marca	Modelo	Frequências de Operação	Distância de Leitura (metros)	Protocolo	Preço (euros)
Confidex	Casey	EU e USA	>9	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,23 cada [22]
SMARTRAC	DogBone RFID Wet Inlay (Monza 4D)	EU e USA	>6.1	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,32 cada [24]
	ShortDipole RFID Wet Inlay (Monza 5)	EU e USA	>4.06	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,24 cada [24]
Alien	HiScan RFID Inlay (ALN-9720, Higgs-4)	EU e USA	>1.52	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,39 cada [24]
	Squiglette RFID Inlay (ALN-9630, Higgs-3)	EU e USA	>3.04	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,39 cada [24]
	Squiggle RFID Wet Inlay (ALN-9740, Higgs-4)	EU e USA	>4.57	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)	0,35 cada [24]

Tabela 2.9: *Tags* RFID UHF comerciais.

Construir um sistema RFID pode custar milhares de euros e, além disso são sistemas muito pouco flexíveis, tanto em termos de adaptabilidade a diferentes tipos de solução, como também em termos de protocolos. Em geral, os leitores são baseados em chips RFID e já integram um *front end* e têm já o protocolo implementado. Estes leitores têm a desvantagem de não poderem ser atualizados ou alterados. Por isso, caso surja um novo protocolo RFID ou caso haja a necessidade de se alterar ou implementar um protocolo específico, por exemplo para uma determinada solução, estes leitores não poderão acompanhar essa alteração.

Capítulo 3

RFID *Front End*

3.1 Arquiteturas de Rádio

O *front end* analógico é umas das partes mais críticas de um sistema de rádio, uma vez que é o responsável pelas características que determinam o desempenho do seu sistema global, nomeadamente a sensibilidade, a eficiência espectral, a relação sinal/ruído ou o consumo energético.

3.1.1 Recepção

As arquiteturas de recepção de sinais de rádio, tradicionalmente usadas, podem ser divididas em dois grandes grupos:[25]

- conversão direta (*direct-conversion*) também conhecido como homodino (Figura 3.1)
- transmissão de conversão *Intermediate Frequency* IF (*dual-conversion*) também conhecido como heterodino (Figura 3.2)

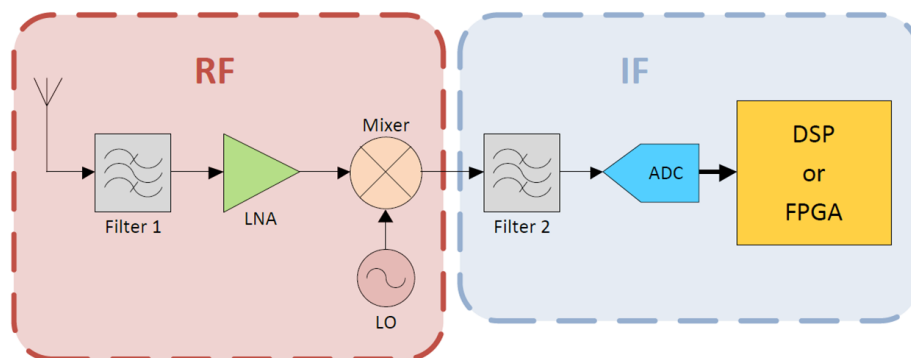


Figura 3.1: Arquitetura de um Recetor Homodino. [25]

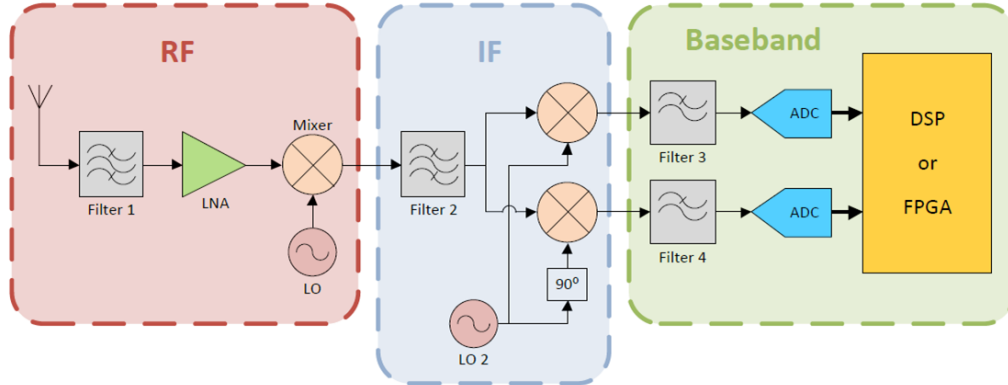


Figura 3.2: Arquitetura de um Recetor Heterodino. [25]

A arquitetura de receção homodina é uma configuração simples de implementar e apresenta um menor número de componentes em relação à arquitetura heterodina. Geralmente nesta arquitetura o sinal é filtrado e amplificado sendo depois feito diretamente o *down-conversion*/desmodulação do sinal RF para banda base, através de um único sinal de referência gerado por um oscilador local (LO). O sinal em banda base, depois de ser convertido na ADC (do inglês: *Analog-To-Digital Converter*), é processado por uma FPGA ou uma DSP. Esta configuração tem a desvantagem de poder ter problemas de DC *offset* [26], sendo, por isso, aconselhado o oscilador local ser de boa qualidade.

A configuração heteródina é mais complexa do que a homodina e apresenta um maior número de componentes. As arquiteturas do tipo heteródina apresentam em geral dois ou mais osciladores locais, como por exemplo, a variante super-heteródina que se pode ver na Figura 3.2. Nesta configuração, o recetor é dividido em 3 estágios principais: o estágio RF, onde é recebido o sinal RF; o estágio IF; e, o subsequente estágio banda base.

Primeiro é feito o *down-converter* do sinal RF para uma frequência intermédia (IF), usando o primeiro oscilador local. De seguida, o sinal é filtrado para a banda pretendida e, mais uma vez, é feito o *down-conversion*/desmodulação para a banda base, usando o segundo oscilador local. O sinal é então adquirido pela ADC, para ser processado por uma FPGA ou DSP. Esta configuração apresenta algumas vantagens, tais como, o facto de apresentar uma maior imunidade a problemas com DC e ter maior sensibilidade. No entanto, também apresenta desvantagens, como por exemplo, a sua complexidade e a redução da largura de banda.[26]

3.1.2 Transmissão

Análogas às arquiteturas de receção de sinais de rádio, as arquiteturas de transmissão são normalmente idênticas no que refere à sua construção e, por essa razão, também é dividida em dois grandes grupos: arquiteturas de conversão direta (*direct-conversion*) ou homodina, onde o sinal banda base que vem da DAC (do inglês: *Digital-To-Analog Converter*) é diretamente convertido para RF; e arquiteturas de conversão de frequência intermédia(*dual-conversion*) ou heterodina, onde o sinal banda base é convertido inicialmente para uma frequência intermédia, através de um oscilador local, e depois é novamente feito um *up-converter* para RF, através do outro oscilador local.

3.2 *Front End* RFID

3.2.1 Blocos do Front Ent

Anteriormente foram apresentados dois grandes grupos de arquiteturas de rádio que normalmente são usadas na construção de *front ends*. Neste projeto é proposto um *front end* homodino para a banda RFID UHF europeia ou americana. Este *front end* foi desenhado de maneira a ser robusto, ser o mais *low-cost* possível. Foi também desenhado de forma a permitir a receção e emissão de sinais de rádio para o funcionamento de um futuro leitor RFID, que pudesse ser integrado em conjunto, por exemplo com uma FPGA ou uma DSP. Existem duas principais tendências na construção de um *front end* UHF para RFID: uma é usar os já mencionados ICs RFID, comercialmente disponíveis, tais como, o Indy R2000 da Impinj [21] ou o AS399X produzido pela Austriamicrosystems [20]; a outra é usar componentes discretos. Embora os ICs RFID permitam reduzir o tempo de desenvolvimento de um leitor, estes componentes requerem vários componentes externos e um microcontrolador para correr uma significativa quantidade de código. Por outro lado, os componentes discretos permitem criar leitores muito flexíveis a nível protocolar ou mesmo na adaptabilidade de soluções especiais e são mais fáceis de otimizar.

O *front end* UHF construído para RFID é composto por sete componentes principais: desmodulador, PLL (do inglês: *Phase Locked Loop*), modulador, filtros, amplificador de potência, ADC e DAC. Estes podem ser vistos na Figura 3.3 e são descritos em detalhe nas secções seguintes.

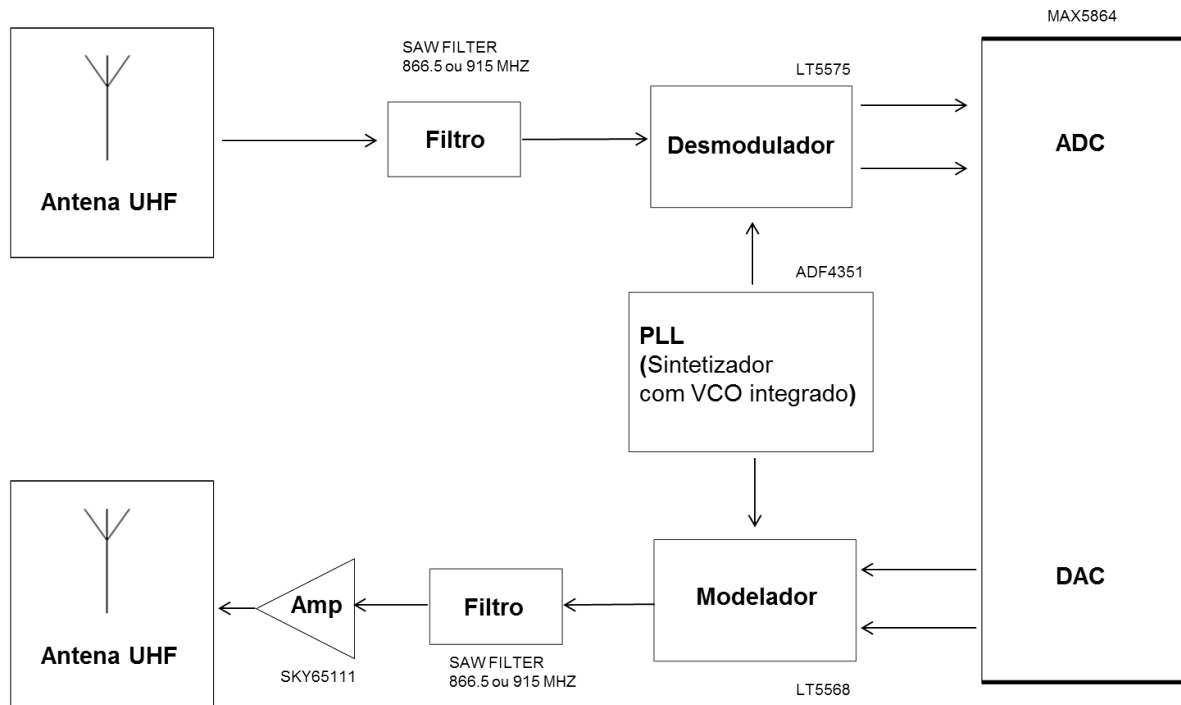


Figura 3.3: Diagrama de Blocos do *Front End*

Os componentes (desmodulador, PLL, modulador, amplificador de potência, ADC e

DAC), têm um *package* QFN de pequenas dimensões e com muitos pinos, requerendo equipamento específico de soldadura. Como esses equipamentos não estão disponíveis nos nossos laboratórios, não foi possível garantir um processo de soldadura rigoroso do IC, desta forma não se garantiu o correto funcionamento destes componentes. No caso do amplificador de potência não foi construída a PCB, visto que o IC também era demasiado pequeno para soldar. No entanto está a ser feito um esforço de forma a encontrar uma solução para a resolução deste problema.

O esquemático completo e o *layout* dos circuitos dos blocos do *front end* desenhado podem ser encontrados no anexo B - Front End de RF.

Desmodulador

O desmodulador IQ é o componente que vai fazer o *down-conversion* do sinal de RF para sinais banda base I e Q para depois serem lidos pela ADC.

Para este estudo foi escolhido o desmodulador IQ *direct-conversion* de alta precisão *quadrature phase shifter* LT5575 (800 MHz - 2700 MHz) da Linear Technology [27], por apresentar uma excelente relação preço-qualidade.

Este desmodulador tem uma entrada RF e uma LO *single-ended*. Cada uma destas entradas tem já incorporado um transformador de impedância apresentada de 50 Ω , assim como as saídas dos sinais I e Q diferenciais. A alimentação pode ir de 4.5V a 5.25V.[27]
O sinal, vindo da antena, após passar pelo filtro, é diretamente encaminhado para a entrada de RF do desmodulador. Uma vez que o fator de ruído do LT5575 é baixo (12,8 dB a 900 MHz), não necessita de um *Low Noise Amplifier* (LNA), poupando assim um componente ao sistema.[27]

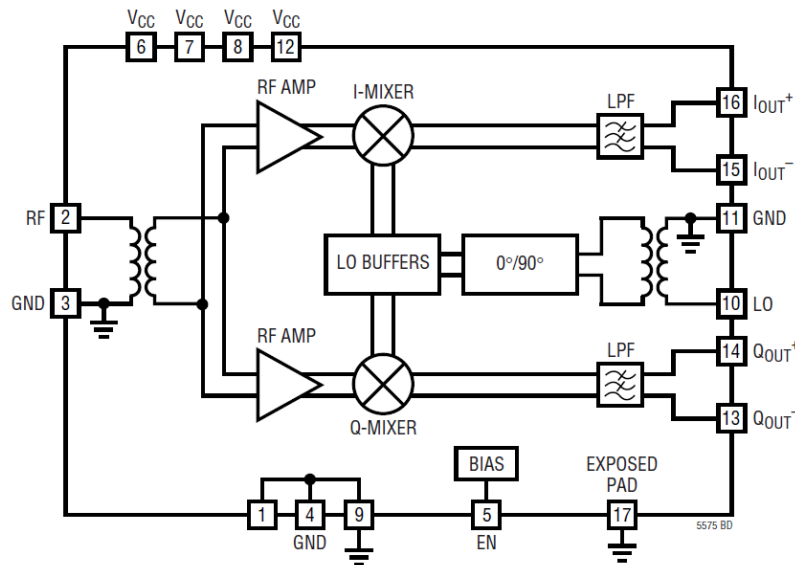


Figura 3.4: Diagrama de blocos interno do Desmodulador IQ LT5575. [27]

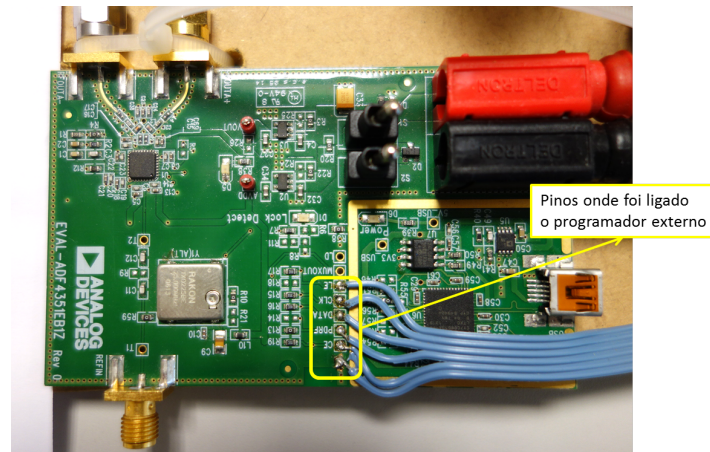


Figura 3.6: Placa de desenvolvimento baseada no ADF4351.

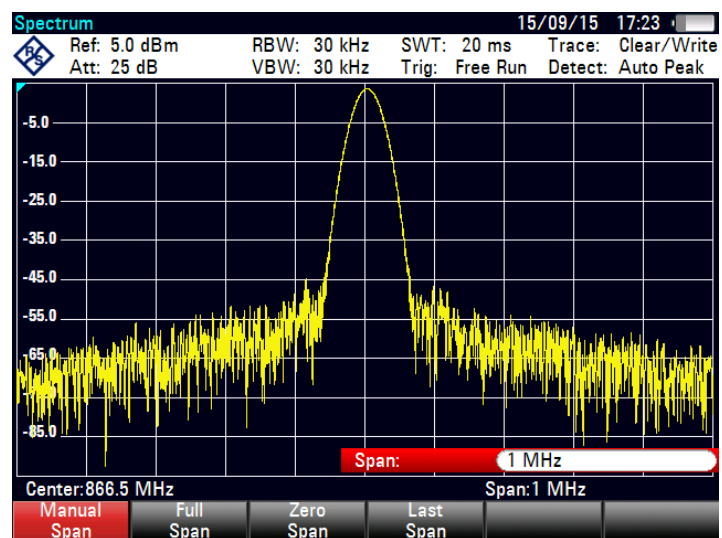


Figura 3.7: Espetro obtido na placa de desenvolvimento para os 866.5 MHz.

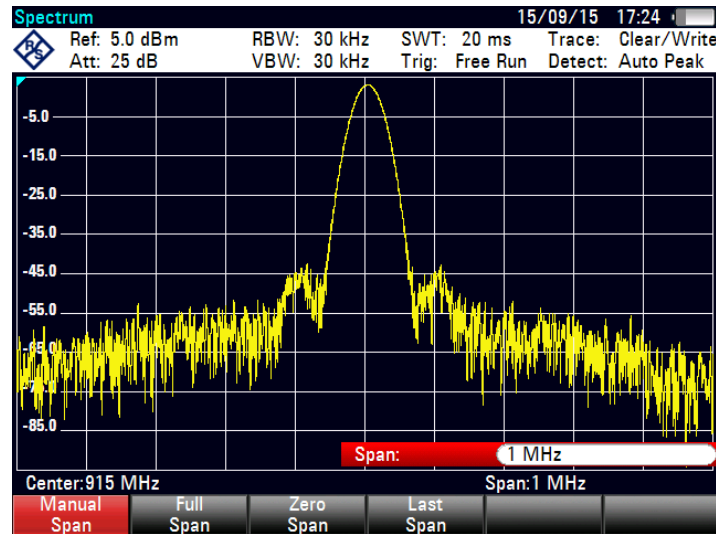


Figura 3.8: Espectro obtido na placa de desenvolvimento para os 915 MHz.

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a utilização do sintetizador de RF ADF4351 encontram-se listados no anexo B.2 - Sintetizador de RF ADF4351 .

Modulador

O Modulador IQ é o componente que vai fazer o *up-converter* do sinal banda base que vem da DAC, para o sinal de RF. Tipicamente este componente tem três entradas principais. A entrada dos sinais em banda base, I e Q, e a entrada do oscilador local.

Para este projeto foi escolhido o Modulador IQ *direct-conversion* rejeita imagem de alta performance LT5568 (700 MHz - 1050 MHz) da Linear Technology [29]. Este modulador oferece um *low noise floor*, uma grande linearidade e um bom *Adjacent Channel Power Ratio* (ACPR), para um RF_{output} level de cerca -8 dBm, o ACPR é de cerca -60 dBc, sendo este um ponto importante para transmitir com a máscara requerida. Uma vez que temos um sinal de saída "limpo", este pode facilmente ser amplificado para 1W ou 2W de potência de saída, nas bandas de frequências pretendidas (Europeia e Americana) para comunicar com as *tags*.

A saída de RF deste modulador é *single-ended* com a imagem suprimida a -46 dBc. As entradas dos sinais IQ são diferenciais, admitindo sinais de entrada I e Q com tensões DC na ordem dos 0.5 V.[29]

A impedância de saída RF, de entrada de LO e dos sinais de banda base IQ é de 50 Ω .

As alimentações suportadas estão no intervalo de 4.5V a 5.25V.[29]

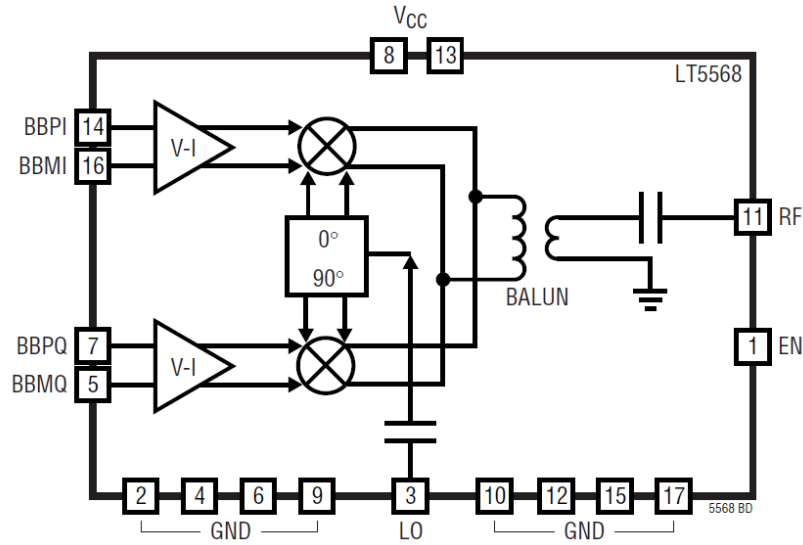


Figura 3.9: Diagrama de Blocos Interno do Modulador IQ LT5568 [29]

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a utilização do modulador IQ LT5568 encontra-se no anexo B.3 - Modulador IQ LT5568.

Filtros

Os filtros passa-banda têm como objetivo permitir a passagem de uma determinada banda de frequências e atenuar as frequências que estejam fora dessa banda.

As frequências de interesse para este projeto são a banda Europeia RFID UHF, ou seja, 865-868 MHz e a banda Americana RFID UHF, 902-928 MHz. Por esta razão, foram escolhidos dois filtros: um filtro do tipo *Surface Acoustic Wave* (SAW) da EPCOS com a referência B3717, centrado na frequência 866.5 MHz com uma largura de banda de 3 MHz, caso se pretenda um *front end* RFID que opere na banda Europeia; e o filtro da mesma marca, com a referência B3588, centrado na frequência 915 MHz e com uma largura de banda de 26 MHz, caso se pretenda que o *front end* opere na banda Americana.[30][31]

O filtro B3717 possui perdas de inserção de 2.1 dB na banda 865 MHz -868 MHz, e uma atenuação de 44 dB na banda 10 MHz - 830 MHz, e 45 dB na banda 965 MHz-1500 MHz.

O filtro B3588 possui perdas de inserção de 2.9 dB na banda 902 MHz-928 MHz, e uma atenuação de 55 dB na banda 10 MHz- 800 MHz, e 50 dB na banda 1020 MHz-1200 MHz. Ambos os filtros possuem uma adaptação interna para sistemas de impedância de 50 Ω .

No *front end* projetado, um filtro é colocado antes da entrada de RF do desmodulador IQ LT5575, outro à saída de RF do modulador IQ e outro depois da saída de RF do amplificador SKY65111.

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a utilização dos filtros encontram-se listados no anexo B.4 - Filtro B3717 e Filtro B3588.

Amplificador de Potência

Como amplificador de potência, escolheu-se um amplificador da Skyworks, com a referência SKY65111. Este amplificador opera na banda de frequências 600–1100 MHz, ou seja, cobre as bandas Europeia e Americana, apresentado um ganho ajustável até 33 dBm, ou seja, 2 Watts. Este amplificador a 915 MHz apresenta um P1dB a 29.5 dBm e um IP3 a 36 dBm. A alimentação usada deste amplificador deve ser de 3.5V, apesar de aceitar voltagens entre os 2.5V e os 5V.

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso projetada para a utilização do amplificador de potência SKY65111 encontram-se listados no anexo B.5 - Amplificador de Potência SKY65111.

ADC e DAC

Um componente muito importante no front-end é o bloco responsável pela conversão dos sinais analógicos para o domínio digital e dos sinais digitais para domínio analógico. Para que esta conversão seja possível foram usadas ADCs e DACs. Para este bloco foi escolhido o IC MAX5864 da Maxim Integrated [32], que contém uma ADC e DAC de 22 Msps, *dual-channel*, preparada para sinais IQ diferenciais. O MAX5864 é front-end analógico com ADC e DAC integradas num único IC de baixo custo, que funcionam simultaneamente, em modo *Frequency-Division Duplex* (FDD), ou separadamente, em modo *Time-Division Duplex* (TDD)). Tem uma ADC de 8-bits de resolução e uma DAC de 10-bits de resolução. Estes 18-bits são ligados paralelamente ao processador digital de banda base.

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a utilização do MAX5864 encontram-se listados no anexo B.6 - ADC e DAC, MAX5864.

Programador auxiliar do sintetizador

Com o objetivo de programar os registos da PLL ADF4351, tanto da PCB criada neste projeto como a placa de desenvolvimento comercial que acabou por ser testada, construiu-se uma placa baseada no PIC18LF2550 [33] da Microchip. Através desta placa foram programados os registos através de comunicação SPI e, desta maneira, definidas as frequências e configurações da PLL. A atualização dos registos no PIC18LF2550 foi feita, por USB, através de um computador.

O esquemático, o preço dos componentes, o layout e a fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a utilização do PIC18LF2550 encontram-se listados no anexo B.7 - Programador auxiliar do sintetizador , PIC18LF2550.

Capítulo 4

Antenas RFID

4.1 Introdução

As comunicações sem fios (do inglês, *wireless*) datam já do século XIX, mas ao longo das últimas décadas tem havido uma expansão exponencial deste tipo de comunicação, estando presentes em aplicações como GPS, TV, comunicações satélite, Wifi, Bluetooth ou RFID. Por serem aplicações sem fios, todos estes sistemas requerem de antenas para que a comunicação se estabeleça. Antenas são, então, componentes essenciais em todos os sistemas de comunicações sem fios. Elas são responsáveis por converter ondas guiadas em ondas eletromagnéticas a transmitir pelo espaço. São também responsáveis por receber essas ondas eletromagnéticas de forma a se poder converter em sinais elétricos guiados.

Podemos dizer que as antenas dividem-se em 3 grandes grupos:

- antenas constituídas por um fio: antena dipolo, antena monopolo, antena em *loop*, entre outras.



Figura 4.1: Antena em *loop*. [34]

- antenas formadas por uma abertura: *horn* antena, antenas *cavity backed slot*, entre outras.

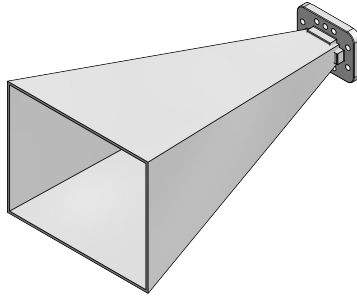


Figura 4.2: *Horn* antena. [35]

- antenas impressas: *patch* antenas, entre outras.

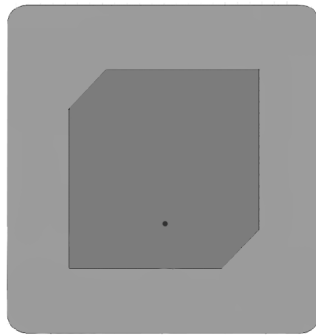


Figura 4.3: Antena *patch*.

Para descrever a performance de uma antena é necessário ter em conta vários parâmetros, sendo os seguintes os mais importantes a considerar: os diagramas de radiação, a diretividade, o ganho e eficiência, a impedância de entrada, a largura de banda e a polarização. Estes são descritos em detalhe na secção 5.2.

Na verdade, todos os parâmetros mencionados acima estão dependentes do design da antena e, por isso, podemos dizer que alguns dos serviços e performances do futuro na comunicação wireless podem estar dependentes desses mesmo designs e limitados por eles, exigindo assim alguma imaginação e visão no sentido de ultrapassar os próprios limites das leis da física.

4.2 Parâmetros Fundamentais das Antenas

4.2.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação da antena é uma descrição matemática ou uma representação gráfica da variação da energia irradiada pela antena para o espaço, usando por exemplo um sistema de coordenadas esféricas.

Sendo a antena um elemento que emite ou recebe ondas eletromagnéticas, o diagrama de radiação ao representar graficamente o campo elétrico, potência, ou outro, é uma informação muito importante no RFID. Esse diagrama, exemplificada na Figura 4.4, serve então para analisar como a radiação está distribuída no espaço circundante, sendo isto fulcral

para determinar em que raio as *tags* devem ser colocadas para serem alimentadas pela antena, principalmente no caso das *tags* passivas ou semi-ativas.

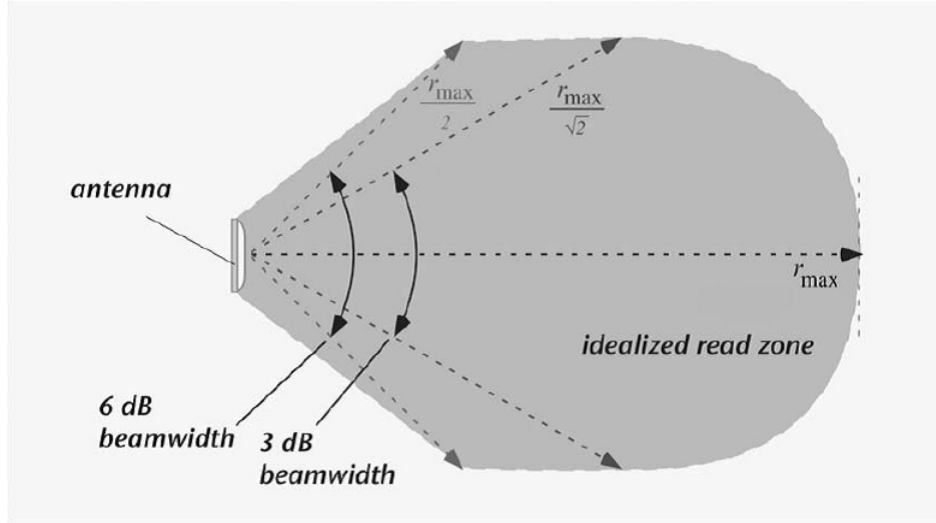


Figura 4.4: Diagrama de Radiação.[3]

Os diagramas de radiação das antenas podem ser classificados em 3 classes: isotrópica, omnidirecional num plano e direcional e são descritas em detalhe nas subsecções seguintes.[36]

- Isotrópica

Corresponde ao diagrama que irradia de forma uniforme a mesma quantidade de radiação em todas as direções, como se pode ver na Figura 4.5. Na verdade este tipo de antena não existe, servindo apenas como referência para demonstrar propriedades direcionais de antenas reais.

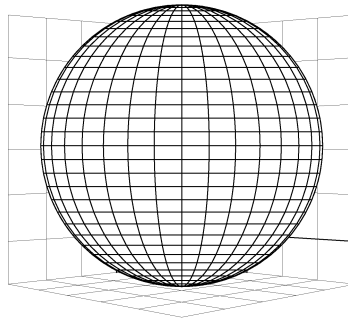


Figura 4.5: Diagrama de radiação isotrópico.

- Omnidirecional num plano

O diagrama de radiação apresentado na Figura 4.6 com o formato de um *doughnut*, apresenta características omnidirecionais, ou, por outras palavras, existe um plano onde a radiação é constante e máxima, estando a radiar a potência máxima para os lados, contrariamente ao que acontece no centro.

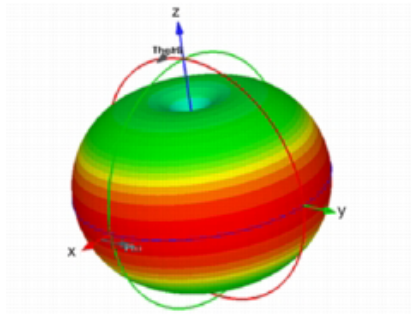


Figura 4.6: Diagrama de radiação omnidirecional. [2]

- Direcional

O diagrama de radiação apresentado na Figura 4.7, apresenta características direcionais, ou seja, as antenas emitem a radiação máxima numa única direção. Neste tipo de diagrama, além do lóbulo principal, também podemos ter lóbulos secundários. No entanto, dependendo do tipo de antenas e das suas aplicações, no geral, é conveniente ter o mínimo de lóbulos secundários, de maneira a maximizar a potência de radiação do lóbulo principal.

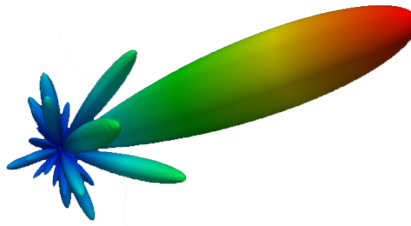


Figura 4.7: Diagrama de radiação direcional.

4.2.2 Diretividade

A diretividade de uma antena mostra quanto a antena é capaz de radiar numa determinada direção. Se uma antena irradiar igualmente em todas as direções, a sua diretividade é igual a 1 e, quando medido em relação à antena isotrópica, é 0 dB. De uma forma simples, a diretividade pode ser descrita como a relação entre a intensidade máxima de radiação de uma antena numa determinada direção e a intensidade de radiação produzida por uma antena isotrópica a irradiar uma potência igual.

De uma forma matemática, devemos começar por definir a intensidade de radiação da antena (U na equação 5.1), e a intensidade de radiação da antena isotrópica (U_o na equação 5.2).

$$U = r^2 W_{rad} \quad (4.1)$$

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (4.2)$$

Sendo r a distância em metros, W_{rad} a densidade de radiação W/m^2 e P_{rad} a potência de radiação total Watts. Se combinarmos essas duas equações, obtemos a equação 4.3. Esta dá-nos a indicação da diretividade D , caso a direção seja especificada.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (4.3)$$

4.2.3 Ganho e Eficiência

O ganho da antena é utilizado para caracterizar o desempenho da mesma, sendo então a relação entre a intensidade de radiação numa dada direção e a que teríamos se a potência entregue à antena fosse radiada de forma isotrópica. A partir dos conceitos acima descritos, podemos então representar o ganho (G) da seguinte forma:

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (4.4)$$

Como se pode ver pela equação 5.5, o ganho relaciona-se com a diretividade da antena, tendo em conta a eficiência de radiação (η), ou seja, contabilizando as perdas ocorridas na antena, como se pode ver de uma forma clara na equação 4.6.

$$P_{rad} = P_{in}\eta \quad (4.5)$$

$$G = \eta D \quad (4.6)$$

Sendo P_{in} a potência de entrada (P_{in}) e P_{rad} a potência radiada (P_{rad})

4.2.4 Impedância de Entrada

Impedância de entrada é definida como sendo a impedância apresentada por uma antena nos seus terminais ou pela relação entre a tensão e a corrente no terminal de entrada da antena.

A impedância de entrada de uma antena é constituída por uma quantidade complexa, em que tanto a parte real a imaginária dependem da frequência.

Para o caso de uma antena em emissão:

$$Z = R_a + jX_a \quad (4.7)$$

A parte real R_a corresponde à potência que é irradiada ou recebida pela antena e a potência dissipada pela condução, enquanto que a parte imaginária representa a potência reativa armazenada no campo próximo da antena, que retorna de novo à fonte.

A adaptação de impedância, designada em inglês por *impedance matching* é então uma parte importante também no design de antenas, dado que a transferência da potência máxima levanta sempre preocupação. Um *matching* apropriado requer que a impedância de entrada da antena iguale o conjugado complexo da impedância da fonte.

4.2.5 Largura de Banda

A largura de banda é um parâmetro que descreve a gama de frequências para a qual uma antena satisfaz as características desejadas. Por outras palavras, é uma gama de frequências para as quais parâmetros como o ganho, a polarização, a impedância de entrada ou a largura de feixe têm valores satisfatórios no seu conjunto para uma determinada aplicação.

Nesta dissertação consideramos que o valor aceitável da desadaptação de impedâncias S_{11} para uma gama de frequências será abaixo dos -10 dB. Ou seja, a largura de banda de uma antena terá de corresponder ao intervalo de frequências para o qual o valor do S_{11} será menor que -10 dB.

4.2.6 Polarização

A polarização de uma antena é a polarização das ondas eletromagnéticas irradiadas pela mesma. A polarização pode ser classificada como sendo linear, circular ou elíptica.

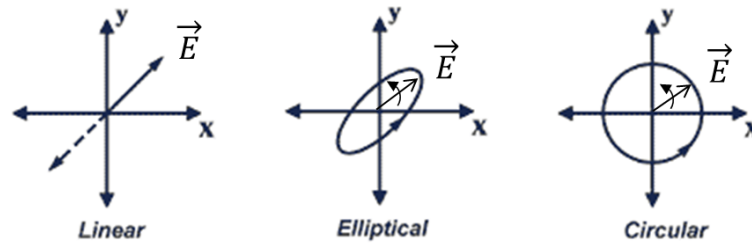


Figura 4.8: Polarização linear, elíptica e circular. [37]

Na polarização linear, a antena irradia energia apenas cujo vetor campo elétrico aponte sempre na mesma direção. A antena pode ser verticalmente polarizada quando o campo elétrico é perpendicular à superfície da terra e horizontalmente polarizada quando o campo elétrico é paralelo à superfície da terra.

Na polarização circular, a antena irradia cujo vetor campo elétrico gira em círculo fazendo um ciclo completo num período de onda. Na polarização elíptica, o campo elétrico tem duas componentes que estão desfasadas 90 graus, de diferentes magnitudes, obtendo por isso uma propagação elíptica.

Finalmente, de notar que a polarização circular e a polarização linear são dois casos especiais de polarização elíptica. Uma onda elipticamente polarizada com uma excentricidade orbital igual a 1 é uma onda polarizada circularmente; e uma onda elipticamente polarizada com uma excentricidade infinita é uma onda polarizada linearmente.

Axial Ratio

O *axial ratio* (AR) é um parâmetro da antena que nos permite analisar o tipo de polarização da onda eletromagnética. Sendo ele a razão entre o comprimento do eixo maior (OA) e o eixo menor (OB) do campo elétrico (E_x, E_y).

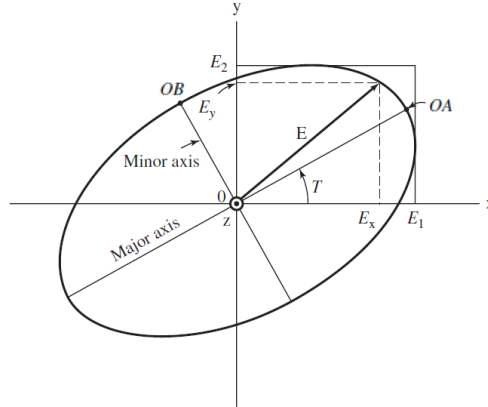


Figura 4.9: Polarização elíptica.[36]

Para uma polarização linear o *axial ratio* é infinito, visto que o campo elétrico só tem uma componente e $OB=0$. Para uma polarização circular do eixo maior (*Major axis*) e menor (*Minor axis*) são iguais ($OA=OB$) que dá um *axial ratio* igual a 1. Para uma polarização elíptica, existe uma diferença entre o comprimentos dos eixos, $1 < AR < \infty$.

Na maioria das aplicações, como no caso no RFID, considera-se uma boa polarização circular, uma relação *axial ratio* inferior a 3 dB, embora o ideal seja 0 dB.

4.3 Antenas Impressas (Microstrip)

Antenas impressas são constituídas fundamentalmente por três partes: o dielétrico, consistindo de duas camadas de material condutor opostamente impressas sobre um substrato; um plano de massa; e a *patch*, que é o elemento radiante e ressonante da antena.

A *patch* pode ter várias formas, como se pode ver na Figura 4.10. Para este projeto, a *patch* usada é constituída por uma fina camada de cobre sobre um substrato não condutor, o FR4. Do lado oposto ao substrato encontra-se o plano de massa, sendo também constituído por uma fina camada de cobre.

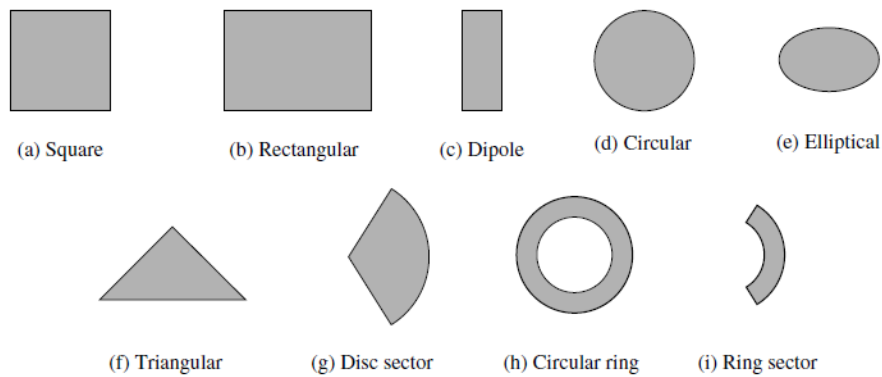


Figura 4.10: Várias formas do elemento radiante (*patch*). [36]

Apesar da primeira patente sobre antenas impressas ser dos anos 50, só nos anos 70 é que começaram a ser usadas. Inicialmente eram utilizadas para aplicações espaciais, mas hoje em dia são usadas em vários tipos de aplicações, como por exemplo carros, telemóveis, mísseis, aviões, satélites, entre outros.[38]

Um outro exemplo de aplicações onde este tipo de antenas é a tecnologia RFID, tanto nas antenas de leitura, como nas antenas presentes das etiquetas RFID. As antenas impressas apresentam várias vantagens quando aplicadas na tecnologia RFID, tais como, fácil fabrico e montagem, baixo perfil, baixo preço de fabrico, tamanho reduzido e versatilidade termos de polarização, frequência de ressonância e mesmo em termos de impedância. No entanto, este tipo de antenas também apresenta algumas desvantagens: largura de banda estreita, baixa eficiência e não é aconselhável para utilizações de alta potência.[36]

4.3.1 Métodos de análise

Admitindo a *patch* como uma parte (*slot*) de uma linha de transmissão (*microstrip*) o seu projeto baseia-se nos modelos encontrados para as linhas *microstrip*, sendo este um dos métodos mais usados na análise neste tipo de antena. Este método é muito simples e de fácil análise matemática, tendo os seus resultados uma precisão satisfatória para a impedância de entrada e para a frequência de ressonância da antena, em função dos parâmetros físicos (W, L, h) da mesma, como se pode ver na Figura 4.11.

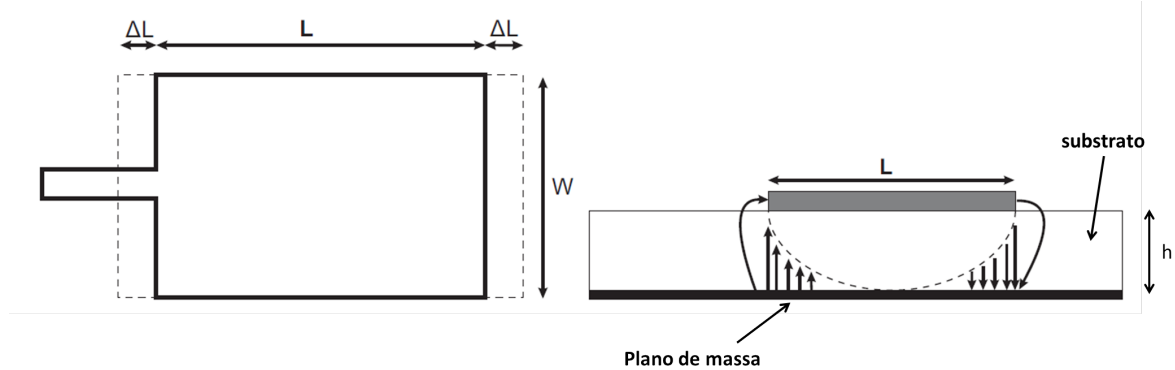


Figura 4.11: Parâmetros físicos de uma antena *microstrip* e suas linhas de campo.

Nas antenas *microstrip*, as *patches* tem dimensões limitadas, existindo linhas de campo de fuga fora da *patch* radiante, que dependem maioritariamente da constante dielétrica ϵ_r , da altura do dielétrico (h), do comprimento (L), da largura (W) e da frequência de funcionamento.

Estas linhas de campo de fuga fazem com que o tamanho elétrico seja ligeiramente superior ao tamanho real da *patch* radiante e, por essa razão, é preciso inserir os conceitos de constante dielétrica efetiva (ϵ_{reff}), largura efetiva (W_{reff}) e comprimento efetivo (L_{reff}). Uma vez que as linhas de campo têm de percorrer um meio não homogêneo, podendo a *patch* radiante estar separada do plano de massa por ar e substrato, a constante ϵ_{reff} é inserida. Os valores de ϵ_{reff} devem estar entre 1 e ϵ_r , sendo aproximadamente constante para valores até 10 GHz.

O ϵ_{eff} pode ser calculado pela equação 4.8.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, \text{ para } \frac{W}{h} > 1 \quad (4.8)$$

Para calcular o comprimento físico usa-se a equação 4.9, que tem em conta o comprimento efetivo da estrutura (L_{eff}), que é adicionado devido à existência das linhas de fuga de campo e que é calculado pela equação 4.11.

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.9)$$

$$\Delta L = \frac{0.412(\epsilon_{eff} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)} \quad (4.10)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.11)$$

Dos vários modos de funcionamento das antenas, pode dizer-se que o modo de ressonância TM_{010} é o principal. Da equação 4.12 (onde c é a velocidade da luz) obtém-se a frequência de ressonância (f_r), tendo em conta o efeito de linhas de fuga. A largura da *patch* pode ser calculado pela equação 4.13.

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.12)$$

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (4.13)$$

4.3.2 Métodos de Alimentação

Existem vários métodos para alimentar as *patches* das antenas e, em todos eles, podemos encontrar vantagens e desvantagens, criando, desta forma, a necessidade de um estudo prévio para identificar o melhor método para o tipo de aplicação pretendido.

Os métodos de alimentação podem ser classificados em dois grupos: com contacto e sem contacto. Nos métodos com contacto, a antena alimenta diretamente a *patch*, enquanto que no método sem contacto, é usado o acoplamento eletromagnético para transferir energia para a *patch*.

Os principais tipos de alimentação com contacto são a alimentação por linha de transmissão e a alimentação por cabo coaxial, enquanto que os principais tipos de alimentação sem contacto são a alimentação por fenda, o acoplamento e a linha enterrada.

Alimentação por Linha de *Microstrip*

Neste tipo de alimentação, a *patch* é alimentada diretamente por uma linha de transmissão. Este método é muito utilizado, uma vez que se trata de um método barato; muito fácil de fabricar porque a linha de transmissão encontra-se sobre o mesmo substrato da *patch*; e, a adaptação da impedância é feita de forma simples.

No entanto, esta alimentação apresenta também algumas desvantagens, nomeadamente, a baixa largura de banda, o diagrama de radiação sofre uma degradação devido à radiação da linha de alimentação, e tem de haver algum cuidado na escolha do substrato, de maneira a não prejudicar a radiação da antena.

Na Figura 4.12 podemos ver um exemplo de uma alimentação por linha de transmissão.

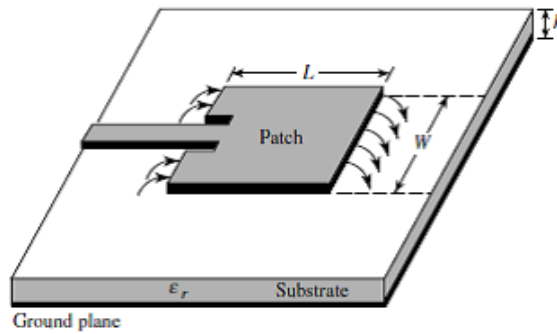


Figura 4.12: Alimentação por Linha de Transmissão. [36]

Na Figura 4.13 podemos ver o circuito equivalente à linha de transmissão, constituído por uma resistência, uma indutância e uma capacidade em paralelo, ligado a outra indutância em série.

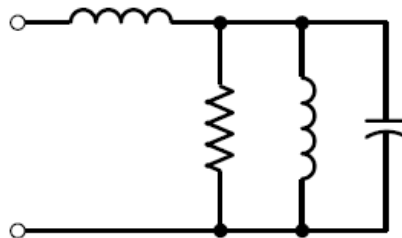


Figura 4.13: Circuito Equivalente à Linha de Transmissão. [36]

Alimentação por Cabo Coaxial

O método de alimentação por cabo coaxial é umas das técnicas mais utilizadas, principalmente nas antenas RFID. Neste tipo de alimentação, o núcleo do cabo coaxial é ligado diretamente à *patch* ou à linha de transmissão, através de um buraco no substrato, e o exterior do cabo é ligado ao plano refletor.

A principal vantagem deste método, além da facilidade de fabrico, é que o cabo coaxial pode alimentar diretamente a *patch* ou ligar-se ao condutor, onde a impedância de entrada é igual à impedância característica da linha de alimentação. Como desvantagens este método apresenta duas características de referir: a estreita largura de banda; e, além disso, quando os substratos são muito grossos, levando a um aumento do tamanho do pino de alimentação, a impedância de entrada torna-se mais indutiva, criando-se, assim, um problema de adaptação.

Na Figura 4.14 podemos ver um exemplo de uma alimentação por cabo coaxial.

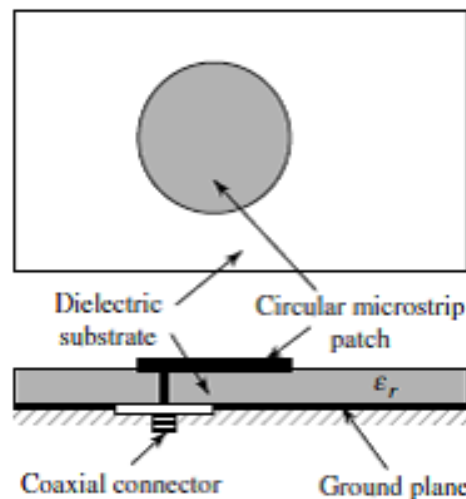


Figura 4.14: Alimentação por Cabo Coaxial. [36]

O circuito equivalente deste método de alimentação é o mesmo da Figura 4.13, da alimentação por linha de transmissão.

Alimentação por Fenda

Neste tipo de alimentação, a *patch* radiante e a linha de transmissão estão separadas por 2 substratos escolhidos individualmente, que estão separados por um plano de massa. O acoplamento entre a *patch* e a linha de transmissão é feito por uma abertura no plano de massa, geralmente centrada entre a *patch* e a linha de transmissão, de maneira a diminuir a polarização cruzada. A principal desvantagem deste tipo de alimentação é a sua dificuldade de fabrico.

Na Figura 4.15 podemos ver um exemplo de uma alimentação por fenda.

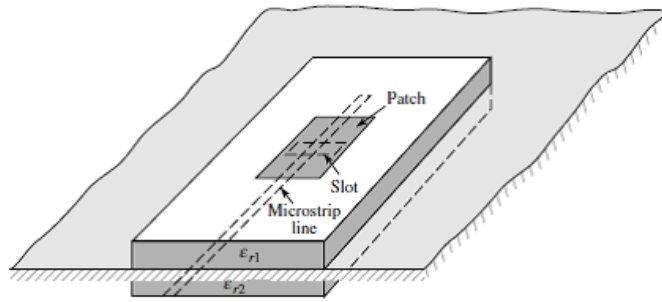


Figura 4.15: Alimentação por Fenda. [36]

Na Figura 4.16 podemos ver o circuito equivalente à alimentação por fenda.

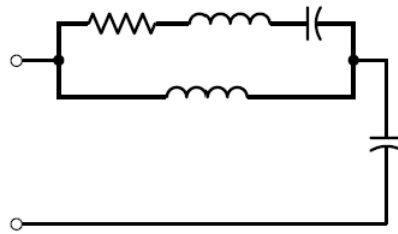


Figura 4.16: Circuito Equivalente à Alimentação por Fenda. [36]

Alimentação por Acoplamento de Aproximação

O método de alimentação por acoplamento de aproximação é um método onde alimentação é feita por acoplamento eletromagnético. Como podemos ver na Figura 4.17, neste tipo de alimentação são usados dois substratos: como substrato inferior, um substrato com uma linha de alimentação impressa no topo e como substrato superior a *patch* impressa. Este método apresenta uma largura de banda mais elevada, mas por outro lado a fabricação deste tipo de alimentação é complexo.

Na Figura 4.17 podemos ver o circuito equivalente à alimentação por acoplamento de aproximação.

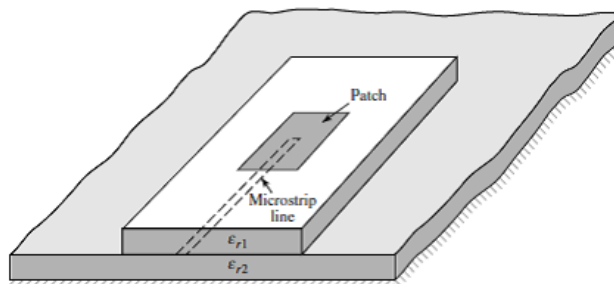


Figura 4.17: Alimentação por Acoplamento de Aproximação. [36]

Na Figura 4.18 podemos ver o circuito equivalente ao acoplamento por aproximação, constituído por uma resistência, uma indutância e uma capacidade em paralelo, ligado a outra capacidade em série.

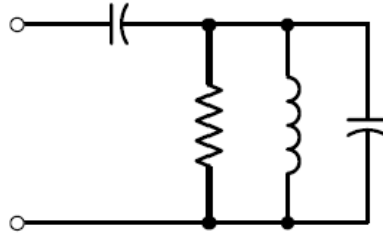


Figura 4.18: Circuito Equivalente à Alimentação por Acoplamento de Aproximação. [36]

4.3.3 Técnicas para Polarização Circular

Hoje em dia a polarização circular é muito importante na indústria do desenho de antenas, não havendo assim a necessidade de orientar as antenas num plano perpendicular à direção de propagação da onda eletromagnética, havendo uma maior flexibilidade entre os posicionamentos das antenas emissoras em relação às recetoras.

As antenas *microstrip* em geral não têm polarização circular, sendo necessário fazer algumas alterações na *patch* da antena ou no modo de alimentação para que a antena seja capaz de gerar uma polarização circular. A Figura 4.19 mostra algumas formas de criar polarização circular no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido contrário.

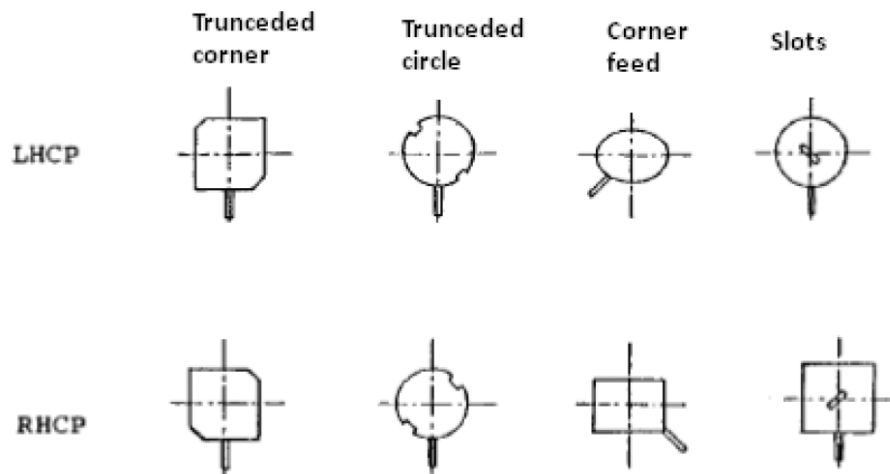


Figura 4.19: Técnicas de polarização circular.[39]

A alimentação das *patches* pode ser dividida em dois grupos, a alimentação simples ou a dupla (Figura 4.20).



Figura 4.20: Polarização circular com alimentação dupla.[39]

Quando a alimentação é dupla, as *patches* são alimentadas com a mesma amplitude e com uma diferença de fase de 90° . Quando a alimentação é simples são usadas técnicas como truncar os cantos da *patch*, truncar as *patches* circulares, usar *slots* nas *patches* ou alimentação nos cantos. [36]

4.4 Implementação da Antena RFID Banda Americana

Uma antena para leitores RFID UHF para funcionar na banda RFID UHF Americana (902-928 MHz) foi desenhada, simulada e otimizada usando o software de simulação eletromagnética CST Microwave Studio (simulação 3D)[40]. Pretendeu-se que esta antena tivesse uma boa performance mas também fosse economicamente viável. Para isso, foram definidos os seguintes requisitos:

- Banda frequência: 902-928 MHz – Banda RFID UHF Americana;
- Polarização circular;
- Axial ratio inferior ou igual a 3 dB;
- S_{11} inferior ou igual a -10 dB;
- Impedância de 50 Ω ;
- Fácil construção;
- Baixo custo.

No sentido de se atingirem estes requisitos, foi desenhada uma antena constituída por 3 elementos: uma *patch* principal, que recebe a alimentação, um plano refletor e uma *patch* parasita (Figura 4.21). A *patch* principal foi desenhada para ter uma frequência na banda pretendida e a *patch* parasita foi calculada para ter uma frequência de ressonância ligeiramente desfasada da frequência da *patch* principal. Com este método pretendeu-se aumentar a largura de banda.

Para se obter uma polarização circular, como foi visto anteriormente, podem ser cortados dois cantos da *patch* em lados opostos. Por isso, foram feitos cortes quer na *patch* principal quer na *patch* parasita. A quantidade cortada nos cantos foi otimizada, de forma a ter a melhor razão de polarização (*axial ratio*), devendo a relação axial ser inferior ou igual a 3 dB, ou idealmente 0dB.

De forma apresentar uma solução barata, fácil de fabricar, com bons ganhos por *patch* e de fácil adaptação à polarização pretendida, foram usadas antenas impressas. Numa primeira abordagem foi escolhido o tipo de substrato dielétrico. O substrato é um elemento físico

importante, uma vez que ele está diretamente relacionado com o modo de operação da antena. Neste caso foi escolhido o substrato FR-4 de 1.6 mm de espessura, visto ser um substrato vulgarmente disponível, por isso de baixo custo (cerca de 60 euros por metro quadrado), com uma constante dielétrica igual a $\epsilon_r=4.3$ e tangente de perdas $\tan\delta=0.02$.

O tipo de alimentação escolhido para as antenas foi a alimentação por cabo coaxial, uma vez que permite uma construção mais simples quando o ar é usado como substrato.[36]

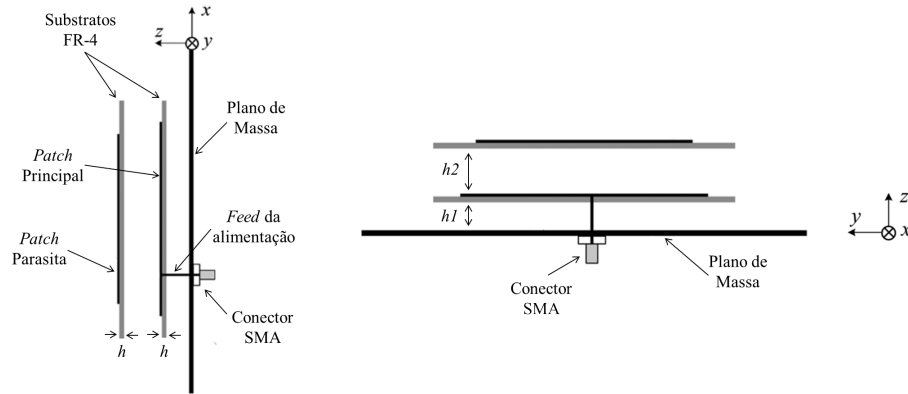


Figura 4.21: Configuração proposta para a antena. Do lado esquerdo temos uma vista lateral e do lado direito vista de cima.

Nas primeiras simulações foram usadas dimensões calculadas a partir das equações do Subcapítulo 4.3.1, que serviu de ponto de partida para a otimização nas dimensões das *patches* quadradas.

Nas subsecções seguintes são apresentados o layout resultante da antena dimensionada usando o programa de simulação, e é apresentado determinados parâmetros de saída obtidos nas simulações computacionais e dos testes experimentais efetuados á antena, depois de se obter as melhores dimensões da antena das várias otimizações feitas.

4.4.1 Resultados das Simulações

Nas simulações foram usados as seguintes definições de entrada no programa de simulação:

- Banda de frequência: 800-1000 MHz
- Solver settings (Accuracy): -80 dB
- Global Mesh Properties
 - Linhas por comprimento de onda: 30
 - Limite inferior da mesh: 15
 - Mesh line ratio limit: 30

Layout

A configuração da antena resultante é apresentada na Figura 4.21 e é dimensionada pelos seguintes parâmetros: espessura do substrato (h); espaçamento entre o plano de massa e a

patch principal ($h1$); e espaçamento entre a *patch* principal e a *patch* parasita ($h2$). Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados os designs da *patch* principal e da *patch* parasita, respectivamente, dimensionadas pelos seguintes parâmetros: dimensão da aresta do quadrado da *patch* principal e do quadrado da *patch* parasita ($X1$ e $X2$, respectivamente); quantidade truncada da *patch* principal e da *patch* parasita (Corte1 e Corte 2, respectivamente); distância entre o centro da *patch* e o *feed* de alimentação (Y_{port}); dimensão da aresta do quadrado do substrato onde estão inseridas as *patch* principal e parasita (L_p); e, finalmente, a dimensão da aresta do quadrado do plano de massa (L_g). Todos estes parâmetros e respectivas dimensões otimizadas são apresentados na Tabela 4.1.

Parâmetro	h	h1	h2	X1	Corte1	X2	Corte2	Yport	Lp	Lg
Dimensão (mm)	1,6	14	18	145,6	18	129	22	36	159	250

Tabela 4.1: Parâmetros e dimensões da antena.

Em relação ao plano de massa(plano refletor) foi também usado FR4 de 1.6 mm (h), com cobre nas duas faces, sendo um quadrado de 250 mm de lado (Figura 4.21). A *patch* principal (Figura 4.22) e a *patch* parasita (Figura 4.23) estão colocadas sobre um substrato FR4 de 1.6 mm (h) de espessura, com um formato de um quadrado de 159 mm (L_p) de lado.

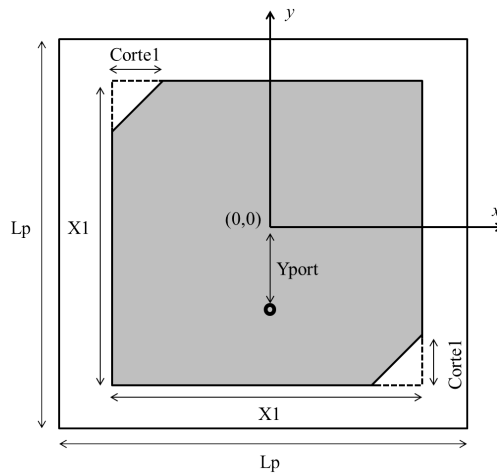


Figura 4.22: *Patch* principal.

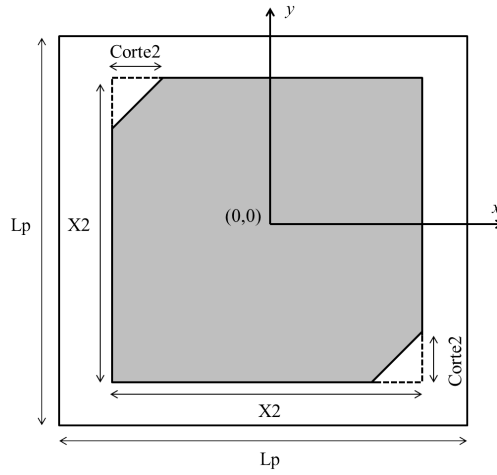


Figura 4.23: *Patch* parasita.

A configuração 3D final da antena simulada pode ser vista na Figura 4.24.

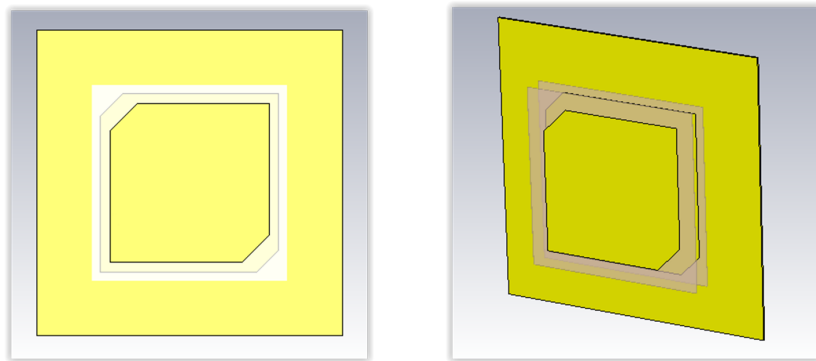


Figura 4.24: Configuração 3D proposta da antena de diferentes ângulos.

Como resultados da simulação para a melhor otimização deste layout foram obtidos os seguintes parâmetros de saída: o *return loss* S_{11} , o diagrama de radiação, o ganho, a eficiência, a impedância real e imaginária, e o axial ratio.

Return loss

O valor mais baixo de *return loss* S_{11} apresentado pela antena foi de -14.55 dB na frequência 915 MHz, sendo esta a frequência central da banda UHF Americana, como pode ser visto na Figura 4.25.

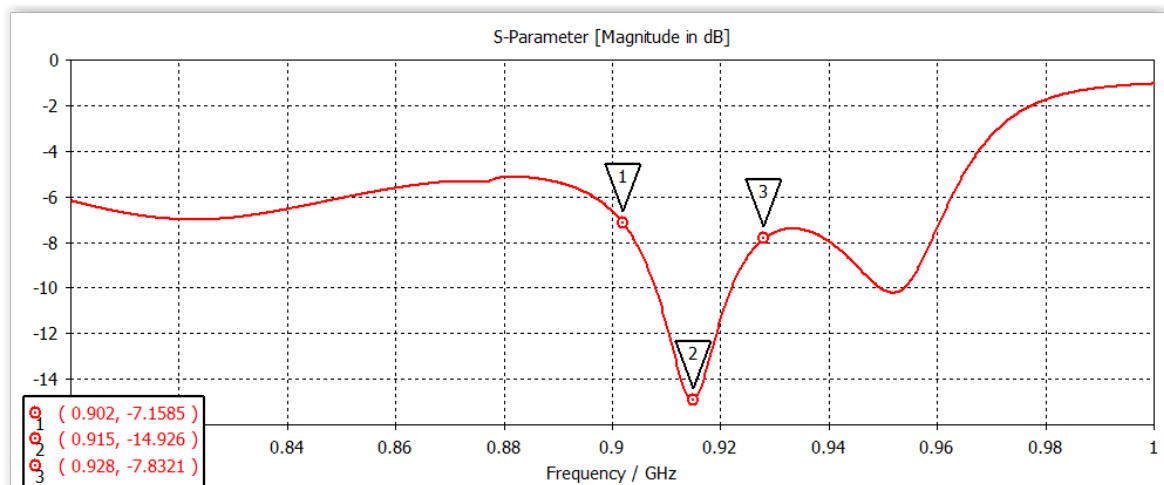


Figura 4.25: Gráfico dos valores do S_{11} simulados.

No sentido de se manter uma polarização circular nos limites aceitáveis, a largura obtida para esta antena foi de cerca 14 MHz, tendo valores aceitáveis de *return loss* entre os 908 MHz e os 922 MHz, não cobrindo dessa maneira toda a banda UHF Americana (902-928 MHz).

Diagrama de Radiação

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram o diagrama de radiação do ganho da antena RFID para banda UHF Americana em 3D e 2D, respetivamente. A antena apresentou um ganho de cerca 8.6 dB na parte frontal, apresentando-se desta forma como sendo adequada a um sistema de RFID, uma vez que este sistema requer antenas direcionais.

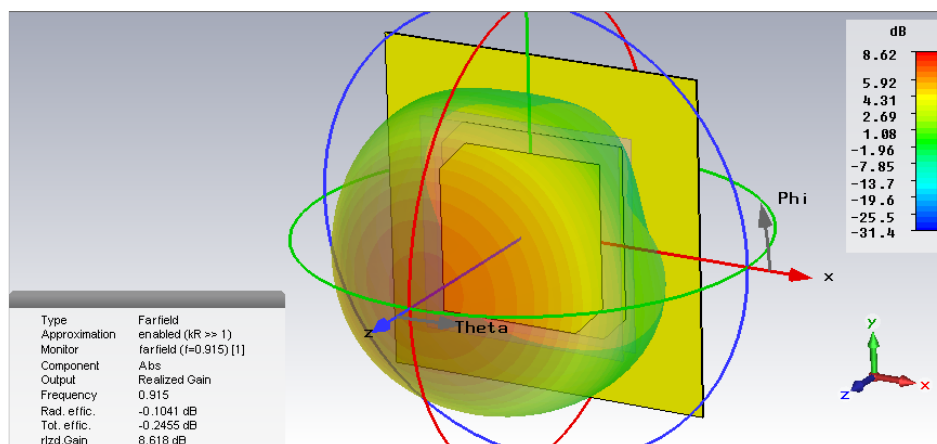


Figura 4.26: Diagrama de radiação para 915 MHz do ganho da antena.

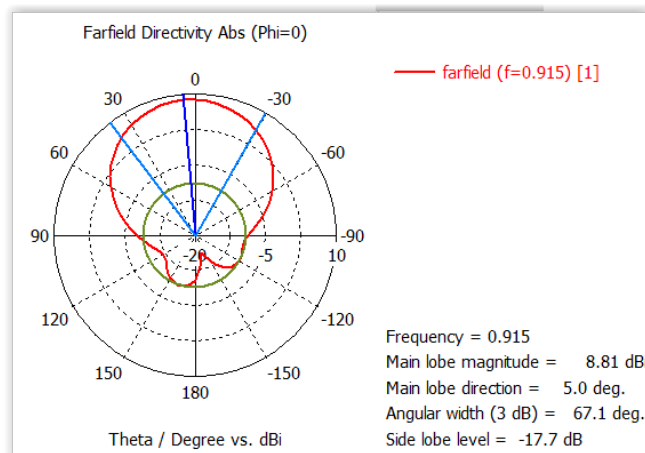


Figura 4.27: Diagrama de radiação 2D do ganho da antena.

Axial Ratio

Na Figura 4.28 é apresentado o resultado da simulação para o *axial ratio*. Para a frequência de 915 MHz, na direção de máximo de radiação ($\theta = 5$) o *axial ratio* apresentou um valor de cerca de 2.18 dB. Uma vez que se pretende uma polarização circular na antena e, por isso, valores iguais ou inferior a 3 dB, o valor de *axial ratio* resultante é adequado ao sistema.

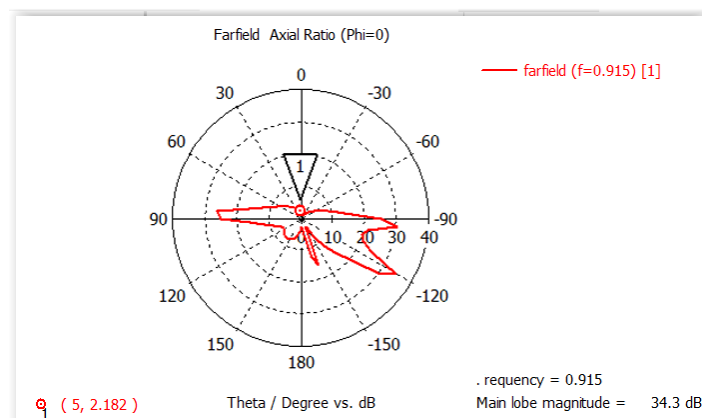


Figura 4.28: *Axial Ratio* da antena simulada para 915 MHz.

Impedância

O valor de impedância pretendido na antena é de 50Ω . No entanto, como se verifica nas Figuras 4.29 e 4.30, respetivamente, parte real e parte imaginária da impedância de entrada, esse valor não foi conseguido em simulação, sendo o valor mais próximo conseguido cerca de 47.6Ω na parte real e cerca de 17.6Ω na parte imaginária.

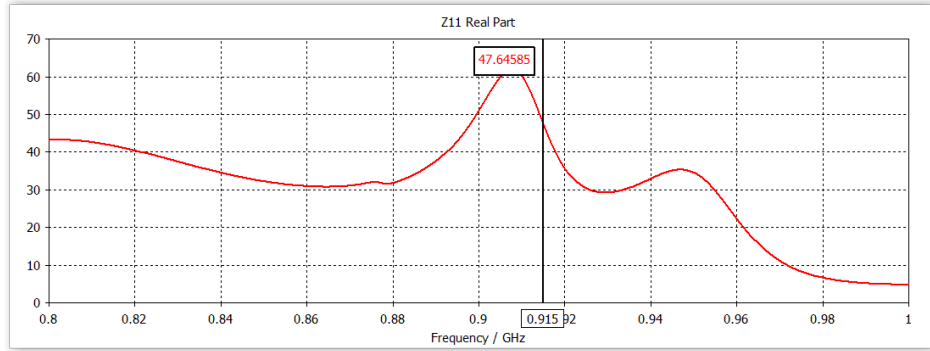


Figura 4.29: Gráfico da parte real da impedância de entrada simulada.

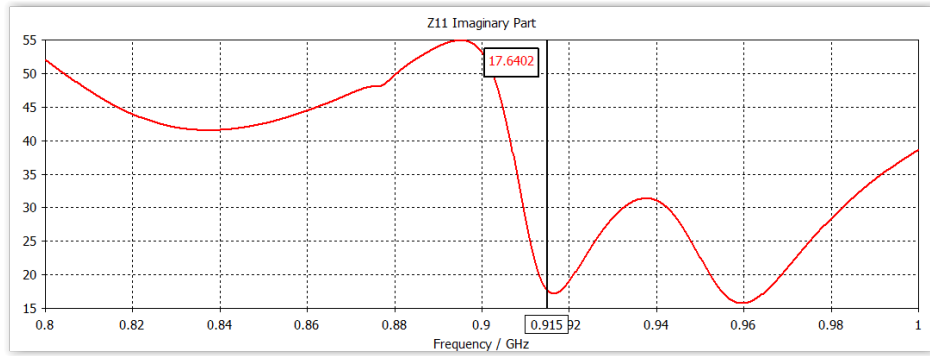


Figura 4.30: Gráfico da parte imaginária da impedância de entrada simulada.

4.4.2 Resultados Experimentais

Uma vez construída, a antena (anexo C.1) foi submetida a testes experimentais para avaliar o seu desempenho e validar os valores obtidos nas simulações computacionais. As medições experimentais dos parâmetros fundamentais da antena foram realizadas numa câmara anecóica, uma vez que estas medições, em particular o diagrama de radiação, requerem um espaço livre, ou seja, um espaço que diminua e disperse reflexões indesejadas das ondas eletromagnéticas. Os parâmetros analisados na câmara anecóica foram: o diagrama de radiação, o ganho e a polarização

O *Network Analyzer* foi utilizado para medir os valores de *return loss* S_{11} . A partir destes valores é avaliada a performance da antena em termos de frequência de ressonância. Para uma boa performance os valores de S_{11} devem ser inferiores ou iguais a -10 dB.

A Figura 4.31 mostra que a 915 MHz, a antena apresentou um *return loss* S_{11} de cerca -13 dB, confirmando a sua boa performance. Embora este valor tenha sido superior ao obtido na simulação numérica (cerca de -15 dB), em ambos os testes, esta antena mostrou ter uma performance adequada. É possível verificar ainda que a antena mostrou ter uma performance adequada numa banda de cerca 10 MHz, menos 4 MHz em relação à simulação computacional.

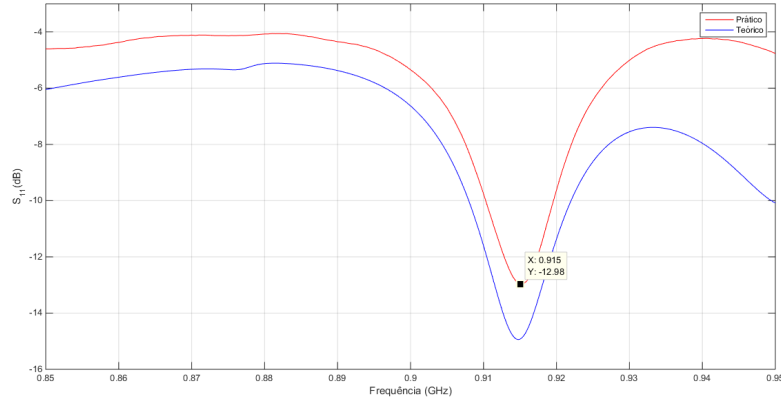


Figura 4.31: Comparação do S_{11} da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

A Figura 4.32 apresenta os diagramas de radiação da antena resultantes da simulação computacional e dos testes experimentais. Em relação à forma do diagrama de radiação, os diagramas apresentaram formas similares no lóbulo principal. No entanto, os valores experimentais apresentaram um pequeno desfasamento à direita, relativamente aos valores resultantes da simulação.

Quanto ao ganho, foi obtido um ganho experimental de cerca 5.5 dB, tendo sido um pouco inferior ao encontrado numericamente, que atingiu valores de ganho de 8.6 dB.

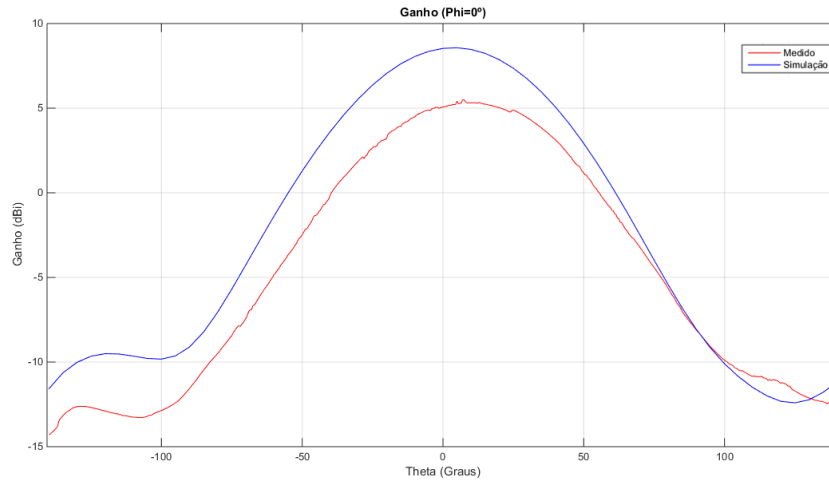


Figura 4.32: Comparação do diagrama de radiação da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

Pela análise dos diagramas de radiação cruzada, mostrados na Figura 4.33, é possível verificar que a antena apresentou uma polarização circular esquerda, uma vez que a componente circular esquerda do campo elétrico é superior à da componente direita, tal como esperado.

A diferença entre a componente elétrica esquerda e a direita encontrada nos valores experimentais foi baixa. Esta degradação da polarização circular foi também confirmada em

termos de *axial ratio*, como pode ver-se na Figura 4.34, pelos elevados valores obtidos, superiores aos parâmetros pretendidos ($axial\ ratio \leq 3\text{ dB}$). Em $\phi=0$, foi obtido um *axial ratio* de 5 dB na direção máxima radiação ($\theta = 7$), ou seja, a antena, ao contrário do desejado, não apresenta boa polarização circular, mas antes uma polarização elíptica. De modo diferente, nos modelos numéricos, a diferença entre a polarização esquerda e a polarização direita foi superior, atingindo um axial ratio inferior ao mínimo desejado.

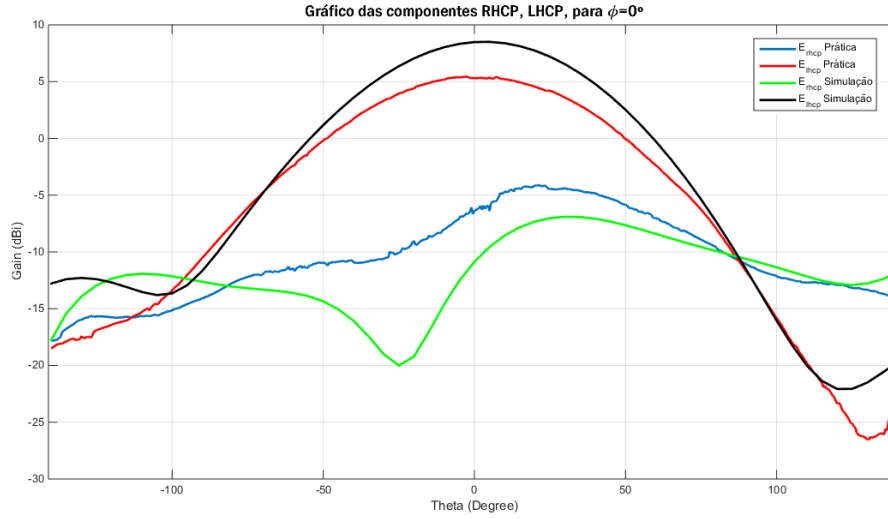


Figura 4.33: Comparação da polarização esquerda e direita obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

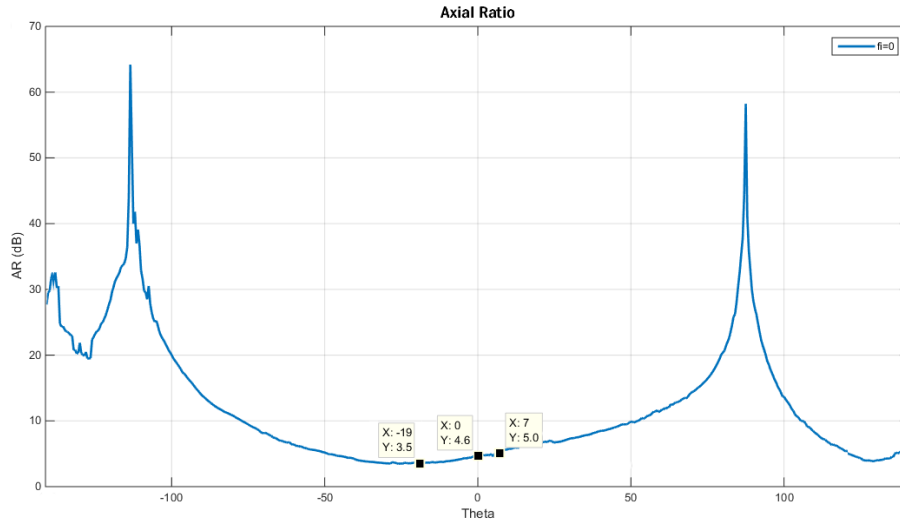


Figura 4.34: *Axial ratio* medido na antena.

Discussão

Esta antena apresentou bons valores experimentais em termos de diagrama de radiação e ganho, no entanto, a antena apresentou um *axial ratio* muito elevado, e por isso, a polarização

circular não foi conseguida, obtendo-se, em vez disso, uma polarização elíptica. Estas diferenças encontradas entre os valores experimentais e os simulados. Estas diferenças podem ser devidas a vários fatores, muitas vezes difíceis de controlar. Como foi visto, no processo de design de antenas, os parâmetros que medem a performance das mesmas podem ser otimizados em simulações numéricas. No entanto, quando as antenas são implementadas e medidas numa câmara anecóica, as performances podem não corresponder aos resultados simulados [41],[42]. De entre os motivos possíveis, destacam-se três. Primeiramente, nas simulações numéricas, o sinal é alimentado diretamente na porta de *input* da antena, enquanto que em medições experimentais, são usados cabos coaxiais que ligam a antena ao equipamento de medida, ou seja, o sinal do dispositivo de medida é alimentado via cabo, gerando perdas que atenuam o sinal e assim podendo resultar em diferenças entre os valores numéricos e experimentais. Um outro motivo relaciona-se com a mais baixa precisão consequente da construção física da antena, que depende não só da precisão da máquina de desbaste do cobre mas também de todos os procedimentos manuais inerentes à sua construção, que podem resultar em ligeiras diferenças dos parâmetros de eficiência da antena. Um terceiro motivo, pretende-se com a definição das propriedades do substrato na simulação computacional que pode não representar fielmente as propriedades efetivas do substrato físico, gerando assim, algumas diferenças em termos de performance da antena.

Uma vez que o objetivo deste projeto é obter antenas para as duas bandas RFID UHF Europeia e Americana, uma outra antena foi projetada para a banda RFID UHF Europeia. Dado que na antena descrita neste capítulo, projetada para a banda RFID UHF Americana, não foi conseguida a polarização circular, o design da nova antena foi então estendido também para abranger a banda RFID UHF Americana. Desta forma, pretende-se que a nova antena, cuja nova configuração é apresentada em detalhe na secção seguinte (Antena RFID Banda Europeia), funcione nas duas bandas.

4.5 Implementação da Antena RFID Banda Europeia

Uma segunda antena foi desenhada, simulada e otimizada mas desta vez para leitores RFID UHF que funcionam na banda RFID UHF Europeia (865-868 MHz). Pretendeu-se que esta antena, tal como na antena descrita anteriormente, tivesse uma boa performance mas também fosse economicamente viável. Para isso, foram definidos os seguintes requisitos:

- Banda frequência: 865-868 MHz – Banda RFID UHF Europeia;
- Polarização circular;
- Axial ratio inferior ou igual a 3 dB;
- S_{11} inferior ou igual a -10 dB;
- Impedância de 50 ohms;
- Fácil construção;
- Baixo custo.

No sentido de se atingirem estes requisitos, foi desenhada uma antena constituída por 3 elementos: uma patch principal, que recebe a alimentação, um plano refletor e uma patch parasita (Figura 4.35).

Pelas mesmas razões, enumeradas na secção 6.1, a alimentação por cabo coaxial foi usada

também nesta antena.

Na alimentação por cabo coaxial, o *feed* pode gerar uma indutância elevada e, consequentemente, uma diferença de impedância. Para tentar cancelar essa indutância, foi introduzida uma reactância. Por esta razão, e com base nos conceitos apresentados na referência [36], a esta antena foi adicionado um quadrado capacitivo, que vai alimentar, por acoplamento, a *patch* parasita.[43]

Para se obter uma polarização circular, foram então feitos cortes nos cantos da *patch* parasita. Mais uma vez, a quantidade cortada nos cantos, foi otimizada de forma a ter a melhor razão de polarização (*axial ratio*), ou seja, inferior ou igual a 3 dB, ou idealmente 0dB.

À semelhança da antena descrita anteriormente, as antenas foram criadas por impressão e o substrato usado foi o FR-4.

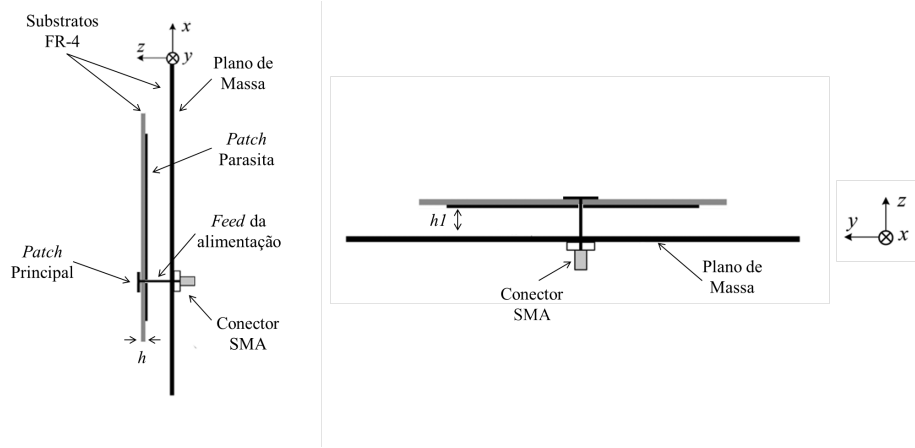


Figura 4.35: Configuração proposta para a antena. Do lado esquerdo temos uma vista lateral e do lado direito vista de cima.

Nas primeiras simulações foram usadas dimensões calculadas a partir das equações do Subcapítulo 4.3.1, que serviu de ponto de partida para a otimização nas dimensões das *patches* quadradas.

Nas subsecções seguintes são apresentados o layout resultante da antena dimensionada usando o programa de simulação, e é apresentado determinados parâmetros de saída obtidos nas simulações computacionais e dos testes experimentais efetuados á antena, depois de se obter as melhores dimensões da antena das várias otimizações feitas.

4.5.1 Resultados das Simulações

Nas simulações foram usados as seguintes definições de entrada no programa de simulação:

- Banda de frequência: 800-1000 MHz
- Solver settings (Accuracy): -80 dB
- Global Mesh Properties
 - Linhas por comprimento de onda: 30

- Limite inferior da mesh: 15
- Mesh line ratio limit: 30

Como resultados de simulação para este layout foram obtidos os seguintes parâmetros de saída: o *return loss* S_{11} , o diagrama de radiação, o ganho, a eficiência, a impedância real e imaginária, e o axial ratio.

Layout

A configuração da antena é apresentada na Figura 4.35 e é dimensionada pelos seguintes parâmetros: espessura do substrato (h) e o espaçamento entre o plano de massa e a *patch* principal (h_1). Nas Figuras 4.36 e 4.37 são apresentados os designs da *patch* principal e da *patch* parasita, respectivamente, dimensionadas pelos seguintes parâmetros: dimensão da aresta do quadrado da *patch* principal e do quadrado da *patch* parasita (X_2 e Q_1 , respectivamente); quantidade truncada da *patch* principal ($Corte2$); distância entre o centro da *patch* e o *feed* de alimentação (Y_{port}); dimensão da aresta do quadrado do substrato onde estão inseridas as *patch* principal e parasita (L_p); e, finalmente, a dimensão da aresta do quadrado do plano de massa (L_g). Todos estes parâmetros e respectivas dimensões otimizadas são apresentados na Tabela 4.2.

Parâmetro	h	h_1	X_2	$Corte2$	Q_1	Y_{port}	L_p	L_g
Dimensão (mm)	1,6	15	150	44	8,8	35	156	250

Tabela 4.2: Parâmetros e dimensões da antena.

Em relação ao plano de massa, foi também usado FR4 de 1.6 mm (h), com cobre nas duas faces, sendo um quadrado de 250 mm de lado. A *patch* principal e a *patch* parasita foram colocadas em lados opostos sobre o mesmo substrato de espessura h e com um formato em quadrado de 159 mm (L_p) de aresta.

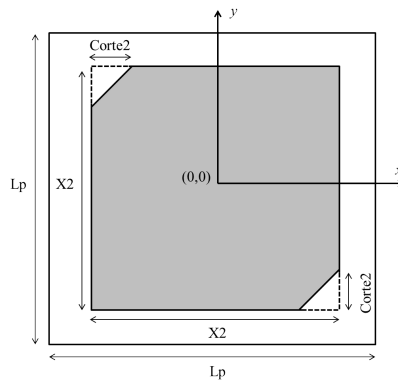


Figura 4.36: Patch parasita.

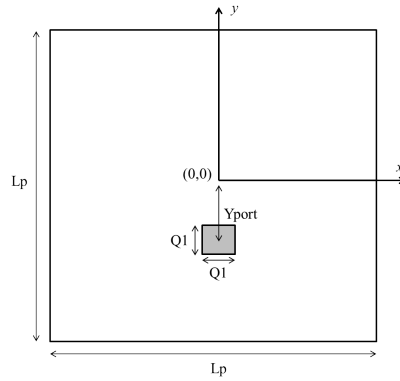


Figura 4.37: *Patch* principal.

A configuração 3D final da antena simulada pode ser vista na Figura 4.38.

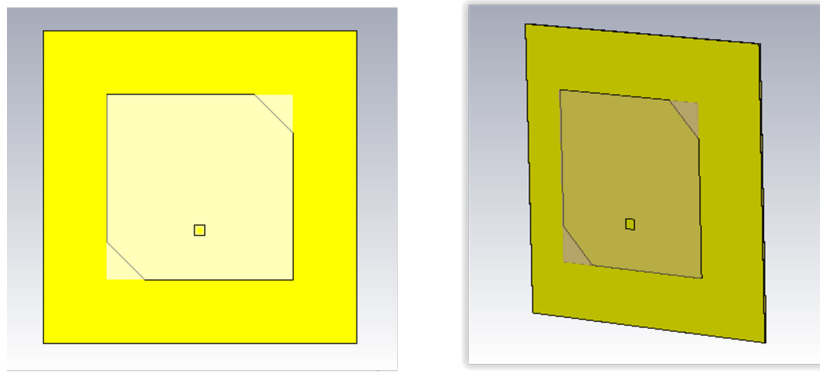


Figura 4.38: Configuração 3D proposta da antena de diferentes ângulos.

Como resultados da simulação para a melhor otimização deste layout foram obtidos os seguintes parâmetros de saída: o *return loss* S_{11} , o diagrama de radiação, o ganho, a eficiência, a impedância real e imaginária, e o axial ratio.

Return loss

Foram obtidos os valores de *return loss* S_{11} de cerca de -20 dB para a frequência de 866.5 MHz (frequência central da banda RFID UHF Europeia) e de cerca -16 dB para a frequência 915 MHz, estando estes valores dentro dos valores pretendidos para o bom funcionamento da antena. Esta antena apresenta boa largura de banda, uma vez que apresenta bons valores de S_{11} para uma banda de frequência de 846-933 MHz, abrangendo assim a banda RFID UHF Europeia e Americana (865-925 MHz) na sua totalidade, como pode ser visto na Figura 4.39.

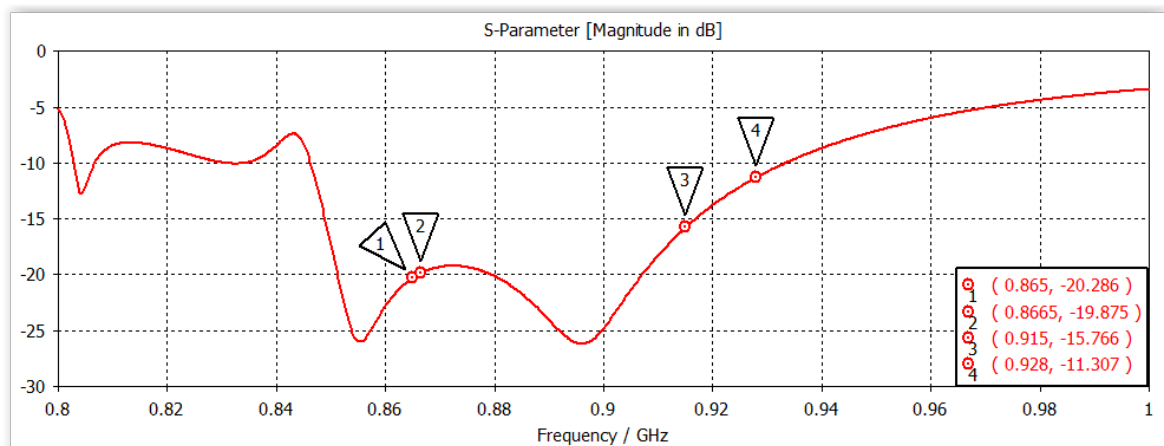


Figura 4.39: Gráfico dos valores do S11 simulados.

Diagrama de Radiação

As Figuras 4.40 e 4.41 mostram o diagrama de radiação do ganho da antena RFID para banda UHF Europeia em 3D e 2D, respectivamente. A antena apresentou um ganho de cerca 8.8 dB na parte frontal, apresentando-se desta forma como sendo adequada a um sistema de RFID, uma vez que este sistema requer antenas direcionais.

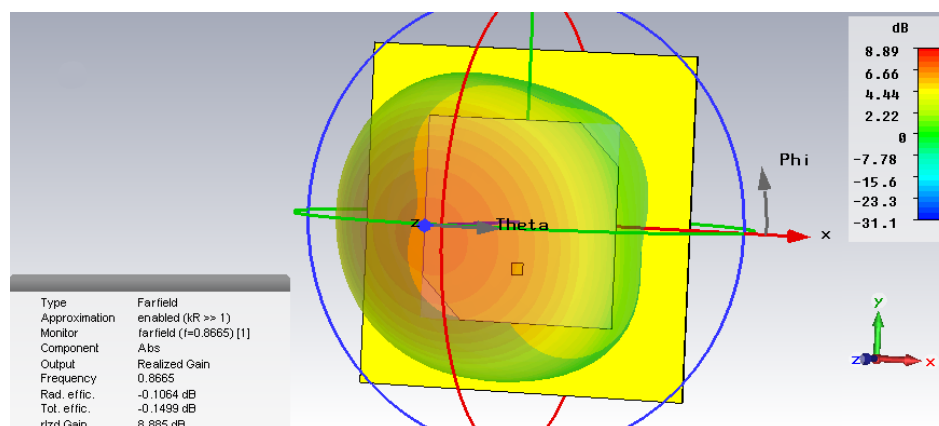


Figura 4.40: Diagrama de radiação para 866.5 MHz do ganho da antena.

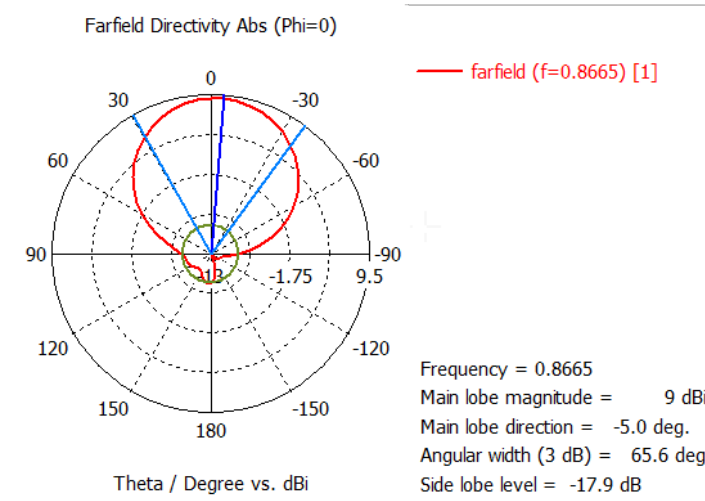


Figura 4.41: Diagrama de radiação 2D do ganho da antenna.

Axial Ratio

Na Figura 4.42 é apresentado o resultado da simulação para o *axial ratio*. Para a frequência de 866.5 MHz, na direção máxima de radiação ($\theta = -5$) o *axial ratio* apresentou um valor de cerca de 2.93 dB. Uma vez que se pretende uma polarização circular na antenna e, por isso, valores iguais ou inferior a 3 dB, o valor de *axial ratio* resultante é adequado ao sistema.

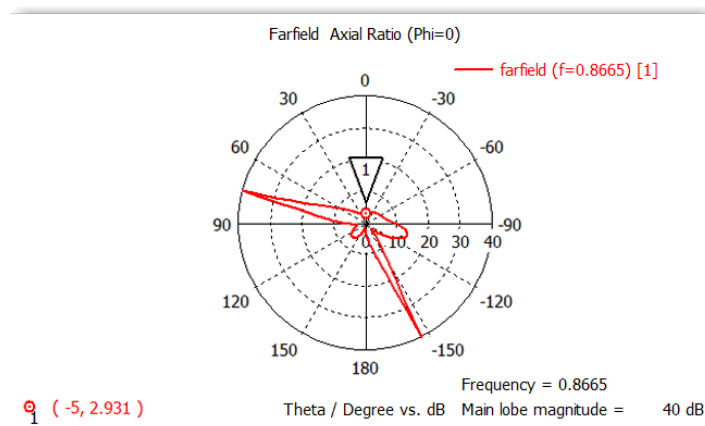


Figura 4.42: *Axial ratio* da antenna simulado para 866.5 MHz.

Impedância

O valor de impedância pretendido na antenna é de 50Ω . No entanto, como se verifica nas Figuras 4.29 e 4.30, respetivamente, parte real e parte imaginária da impedância de entrada, esse valor não foi conseguido em simulação, sendo o valor mais próximo conseguido cerca de 53.4Ω na parte real e cerca de 9.9Ω na parte imaginária.

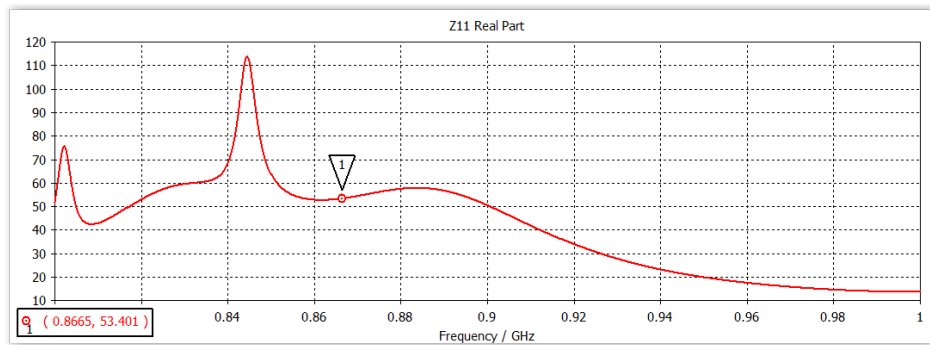


Figura 4.43: Gráfico da parte real da impedância de entrada simulada.

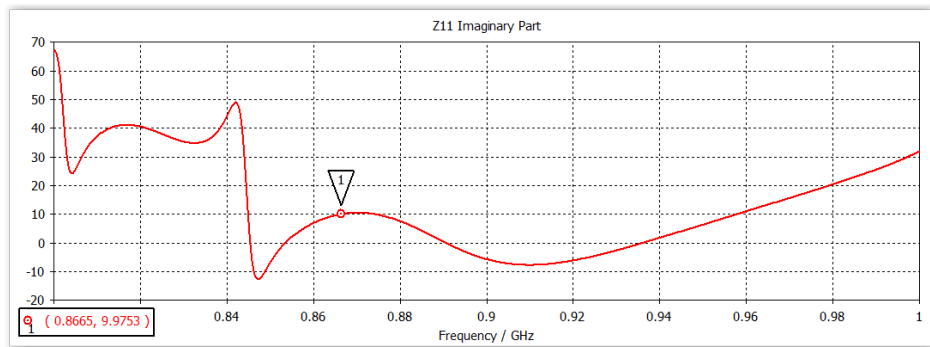


Figura 4.44: Gráfico da parte imaginária da impedância de entrada simulada.

4.5.2 Resultados Experimentais

A antena desenvolvida foi submetida a testes experimentais para avaliar o seu desempenho e validar os valores obtidos nas simulações.

À semelhança dos testes (anexo C.2) feitos para a antena RFID UHF para a banda Americana, as medições experimentais dos parâmetros fundamentais da antena foram realizadas numa câmara anecóica. Os parâmetros analisados na câmara anecóica foram: o diagrama de radiação, o ganho e a polarização.

O Network Analyzer foi utilizado para medir os valores de *return loss* S_{11} . Para uma boa performance os valores de S_{11} devem ser inferiores ou iguais a -10 dB.

A Figura 4.45 mostra que a 866,5 MHz, a antena apresentou um *return loss* S_{11} de cerca -23 dB, confirmando a sua boa performance. Este valor foi mesmo superior ao obtido na simulação numérica (cerca de -20 dB). No entanto, pela análise do gráfico, é ainda possível verificar que existe um pequeno desfasamento à esquerda entre o experimental e o obtido na simulação. Ainda assim, a antena mostrou ter uma boa performance, bem adaptada para a totalidade da banda de frequências RFID UHF Europeia e para a quase toda a cobertura da banda de frequência RFID UHF Americana.

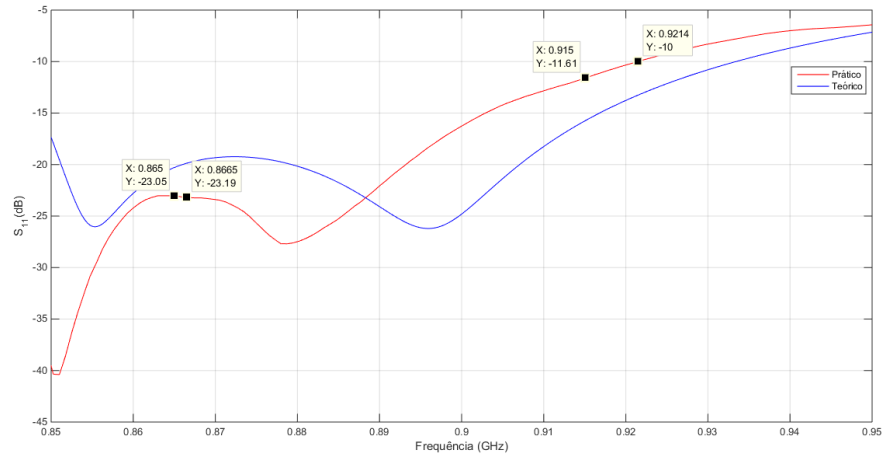


Figura 4.45: Comparação do S_{11} da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

Em termos de diagrama de radiação, que pode ser visto na Figura 4.46, os resultados experimentais apresentam valores muito próximos dos obtidos na simulação numérica, embora apresente um pequeno desfasamento à direita.

Quanto o ganho, foi obtido um ganho experimental de cerca 8.4 dB que, embora um pouco inferior, foi muito similar ao encontrado numericamente, que atingiu valores de ganho de 8.9 dB.

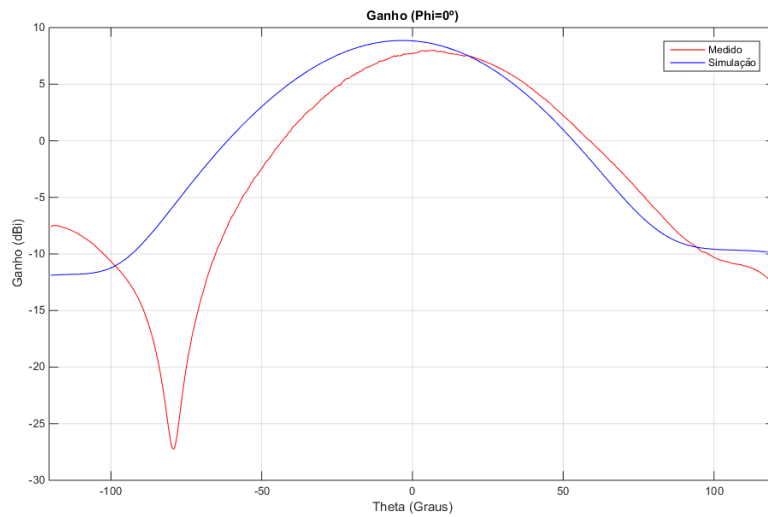


Figura 4.46: Comparação do diagrama de radiação da antena obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

Em termos de polarização, através da análise dos diagramas de radiação cruzada (Figura 4.47), é possível verificar que a antena apresentou uma polarização circular direita, uma vez que a componente direita do campo elétrico é superior à da esquerda, tal como era esperado. Mais uma vez, os valores experimentais apresentam valores muito próximos dos valores obtidos

em simulação.

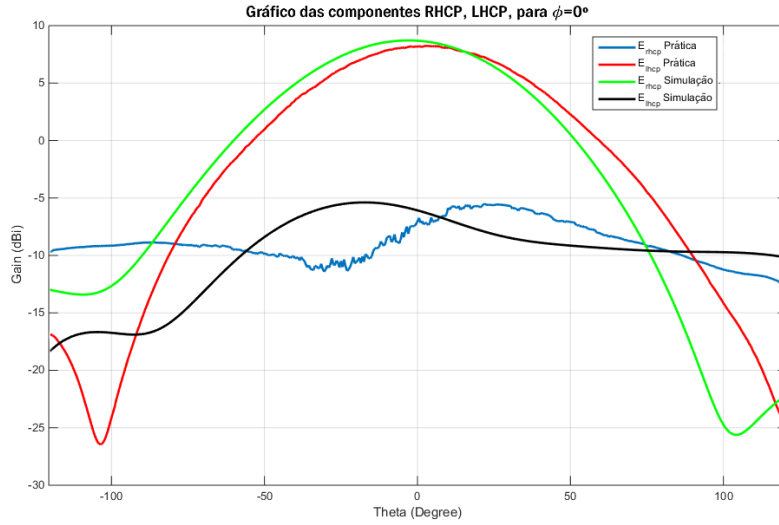


Figura 4.47: Comparação da polarização esquerda e direita obtido experimentalmente e simulado computacionalmente.

Em termos de *axial ratio*, como podemos ver na Figura 4.48, em $\phi=0$, a antena apresentou um valor de 3 dB na direção de máxima radiação ($\theta = 6.5$), encontrando-se assim dentro dos parâmetros pretendidos (*axial ratio* ≤ 3 dB). Os valores experimentais obtidos, mais uma vez, foram similares ao simulados numericamente.

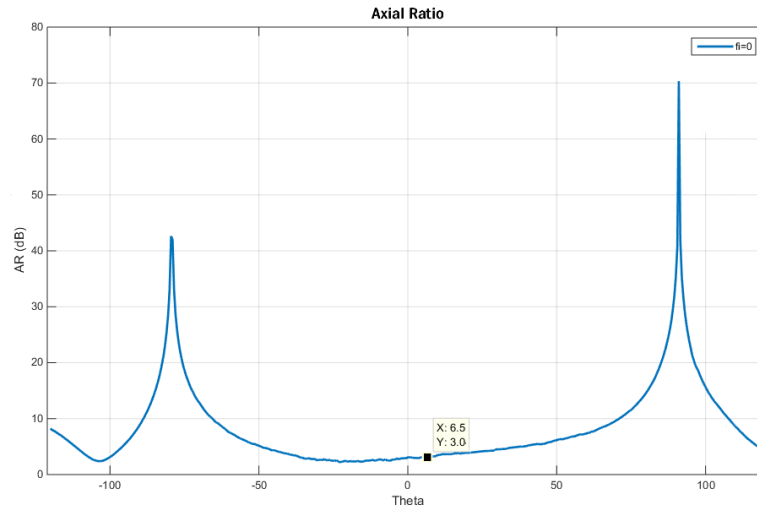


Figura 4.48: *Axial ratio* medido na antena.

Discussão

Esta antena apresentou bons valores experimentais em termos de diagrama de radiação, ganho, polarização circular a *axial ratio*, provando a sua viabilidade para o uso proposto.

Além disso, todos os parâmetros testados apresentaram valores experimentais muito similares aos resultantes da simulação numérica, indicando que a simulação numérica foi adequada. Verificou, no entanto, algum desfasamento no diagrama de radiação experimental relativamente ao simulado. Isto deveu-se a erros de construção física da antena, nomeadamente, falta simetria nos espaçadores e pequenos erros no devaste do cobre na *patch* principal e parasita.

Capítulo 5

Tags RFID UHF

5.1 Introdução

Na concepção de antenas das *tags* para a tecnologia de Identificação por Rádio frequência há alguns aspetos que devem ser considerados: a forma e as dimensões das *tags*; o substrato onde são impressas as etiquetas; e, o seu processo de fabrico. A possibilidade de se obter diferentes formas e dimensões de uma antena torna o dispositivo combinado "IC+antena" ainda mais interessante para o mercado, dado que passa a ser possível a criação de *tags* com a forma do logótipo da empresa ou marca, por exemplo. Os substratos flexíveis têm ganho uma enorme importância nos últimos anos [44],[45],[46], uma vez que as etiquetas podem ser colocadas e coladas em superfícies irregulares. Outra consideração quanto ao material usado como substrato, é que este se enquadre no conceito de tecnologia verde, dadas as crescentes preocupações sobre meio ambiente global. Materiais amigos do ambiente, juntamente com a simplicidade e o baixo custo de fabrico, permitirão que a tecnologia seja descartável sempre que as etiquetas sejam produzidas em massa. A simplicidade dos processos de fabrico é, assim, mais uma preocupação não menos importante, não só porque pode reduzir o preço final do produto, mas também torná-lo disponível para um maior número de pessoas. Além disso, a aplicação de métodos simples e acessíveis no fabrico destes dispositivos tornará simples os processos de re-design e re-dimensionamento, podendo alterar-se as formas das etiquetas de uma forma rápida e simples.

5.2 Importância do Custo

As etiquetas RFID são colocadas nos objetos para que estes possam ser identificados. Se os objetos a serem identificados forem caros e de baixa circulação, o preço das etiquetas não terá grande importância, até porque, à partida, estas terão de ser mais robustas, consequentemente, mais caras. No entanto, se os objetos a serem identificados forem baratos, o preço das etiquetas RFID também tem de ser baixo, caso contrário, a etiqueta terá um impacto significativo no preço final do produto. Este é um problema presente, principalmente, em áreas como o retalho, onde as etiquetas devem ser descartáveis como códigos de barra, uma vez que são produtos de venda em massa e de rápida reposição.

Há diversos tipos de etiquetas usadas em RFID, como descrito no Capítulo 2, mas podem

ser agrupadas em 3 categorias: passivas, semi-ativas e ativas. As etiquetas RFID passivas, são vendidas a cerca de 5-10 centavos em volumes de centenas de milhares ou milhões de unidades, por isso cada componente da etiqueta deve custar alguns centavos. Por essa razão, o substrato da antena, material adesivo, a metalização da antena no substrato, o chip RFID, a colocação do chip e a proteção devem ter o mínimo custo possível. Num futuro próximo acredita-se que o preço do IC baixará para cerca de 1 centavo de dólar [47], fazendo com que a escolha do substrato seja ainda mais relevante no preço final da etiqueta. O preço do substrato deverá então considerar que o preço final da etiqueta não exceda os 3 centavos para que seja uma opção ao conhecido código de barras.

Por razões de acessibilidade tecnológica neste projeto/tese, focar-nos-emos essencialmente na construção de um sistema que combine a importância do substrato, à metalização da antena no substrato, à “colocação do chip” e ao processo de fabrico, usando chips comercialmente disponíveis.

5.3 Substratos

O dielétrico é a estrutura física onde será depositado o material condutor da antena. Por exemplo, nas antenas que servem de emissão RFID, em geral usam-se substratos baseados em fibra de vidro, como o FR4. No entanto, nas *tags*, principalmente nas passivas, esse tipo de material não é muito usado, visto que se pretende obter uma etiqueta mais fina, leve, flexível e barata. Por estas razões, a maioria das *tags* é feita com substratos de filme de poliéster (filme PET), que além de se poder produzir *tags* com as características mencionadas acima, é também um substrato adequado aos processos de fabrico atualmente usados.

Um outro material que tem vindo a ganhar notoriedade em processos de etiquetagem RFID é o papel. O papel pode ser uma excelente opção como substrato para *tags* RFID, visto ser um dos materiais mais baratos alguma vez feitos em produção em massa, tendo então um impacto maior na redução do custo das *tags*. Além disso, o papel é um substrato orgânico de fácil acesso, o que é relevante para o conceito de tecnologias verdes, por causa das já referidas crescentes preocupações sobre o meio ambiente. Um material amigo do ambiente em combinação com simplicidade e baixo custo de fabrico do material permitirá o uso das *tags* RFID de uma forma descartável, adequada para a produção em massa. Com este trabalho, pretende-se criar um sistema RFID que seja competitivo, ou seja, um sistema em que as *tags* obtidas sejam melhores que os códigos de barra e em simultâneos terem preços semelhantes ou até mais baixos.

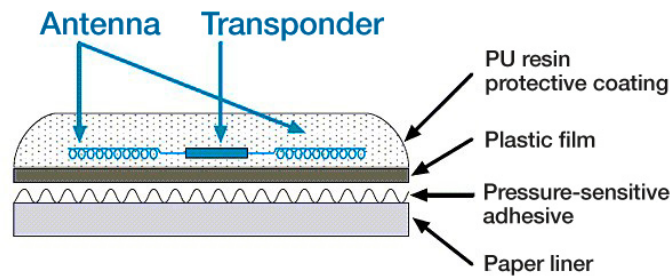


Figura 5.1: Constituição de uma Etiqueta RFID [48]

5.4 Técnicas de Fabrico de Antenas de Etiquetas RFID

Há diferentes técnicas de fabrico de antenas RFID atualmente disponíveis. No entanto, aqui listaremos as vulgarmente usadas: deposição por vácuo; corte; fotolitografia; e, finalmente, serigrafia e impressão de tintas condutoras.

5.4.1 Deposição por vácuo

O depósito metálico via evaporação ou pulverização catódica são processos muito conhecidos e usados na indústria. A antena é criada pela evaporação ou pulverização do material que passa por uma máscara que deixa formar, no substrato, o formato da antena. Uma das desvantagens deste processo prende-se com a acumulação de metal, que é evaporado ou pulverizado, na máscara, tornando necessária a limpeza periódica e, consequentemente, desperdício. Porém este método é barato e simples.

5.4.2 Corte

Neste processo um substrato, contendo o metal depositado, é cortado por laser, numa matriz de corte rotativa. Esta matriz tem o formato pretendido para as antenas. Incluído também neste grupo de técnicas, pode ser usado um outro processo de corte no qual o esqueleto é removido, ficando assim apenas a antena RFID.

Estes processos têm a vantagem de poderem ser feitos de forma barata e a alta velocidade, em processos designados *roll-to-roll* (Figura 5.2). No entanto, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente, a sua limitada resolução, a ocorrência de desperdício, além de permitir pouca flexibilidade em termos de design de antenas, e de ter um complexo processo de montagem do IC na etiqueta.

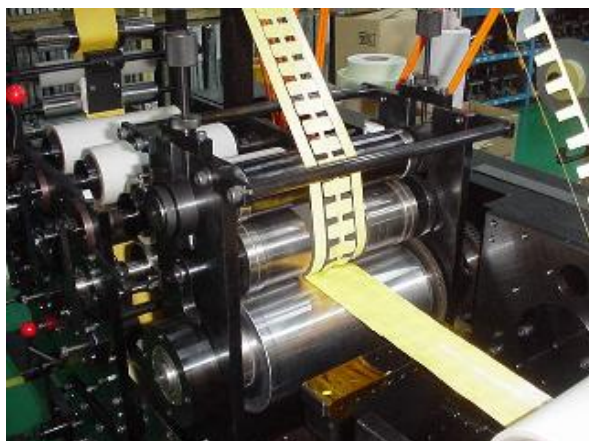


Figura 5.2: Máquina de Corte por Rolo [2]

5.4.3 Fotolitografia

A fotolitografia é, em linhas gerais, o processo de corrosão de cobre galvanizado. Esta técnica tem sido extensivamente usada na indústria, por décadas, e em particular no fabrico de etiquetas RFID, apresentando excelentes resultados. No entanto, este processo tem perdido popularidade por ser lento, por apresentar desperdício do cobre removido e pela dificuldade de eliminar ou tratar os elementos químicos perigosos para o ambiente. Dada a evolução das necessidades na área do RFID, este processo tem perdido interesse também nesta área, sendo usado ainda para pequenas produções, como por exemplo na produção de etiquetas com requisitos especiais tais como etiquetas de alta condutividade ou para protótipos.

5.4.4 Serigrafia e impressão de tintas condutoras

Em processos de serigrafia (Figura 5.3) são usadas tintas que contêm pequenas partículas de prata ou cobre suspensas em soluções. Estas tintas são depositadas nos substratos por serigrafia, roto-gravura ou mesmo por impressão jato de tinta. No último caso, o processo pode ser desafiante visto que as partículas de prata ou cobre podem entupir os pequenos *nozzles* presentes no jato de tinta.

Após a impressão da tinta nos substratos, a tinta tem de ser sinterizada. Em geral, é levada a um forno a altas temperaturas, mas também pode ser sinterizada por fotónica (do inglês, *photonic curing*), em particular, em processos com tinta à base de cobre. Na sinterização das tintas baseadas em partículas de prata, os pequenos flocos de prata estão imersos em solventes que são evaporados durante a sinterização e, dessa maneira, as partículas de prata começam a ligar-se fisicamente entre elas, criando assim uma espécie de rede condutora de partículas. O processo de cura é um dos grandes inconvenientes deste método de impressão, visto que os tempos de cura podem ser elevados e o reduzido número de diferentes materiais em que podem ser feitos apresentam-se ainda como um desafio, limitando a versatilidade do método.

Os benefícios das tintas condutoras são óbvios, uma vez que são muito fáceis de usar, não

requerendo equipamentos complexos ou químicos caros para começar a produção. Um *silk screen printer* e um forno são suficientes. Infelizmente tem algumas desvantagens. Primeiro, as tintas de prata são, obviamente, feitas de prata, que é um metal de elevado custo. Segundo, a condutividade da tinta de prata ainda está longe dos valores da condutividade do cobre ou do alumínio, por exemplo, havendo necessidade de ter linhas de prata de maior diâmetro para que tenha a mesma condutividade desses metais, aumentando consequentemente o custo de produção de todo o sistema. Um terceiro problema presente na utilização da prata tem que ver com a sua elevada propensão à corrosão quando em contacto com o ar, degradando assim o circuito impresso. Este problema está também presente quando o cobre ou o alumínio são usados, embora o processo de oxidação do cobre seja mais lento e do alumínio seja superficial, evitando que o processo de corrosão continue.

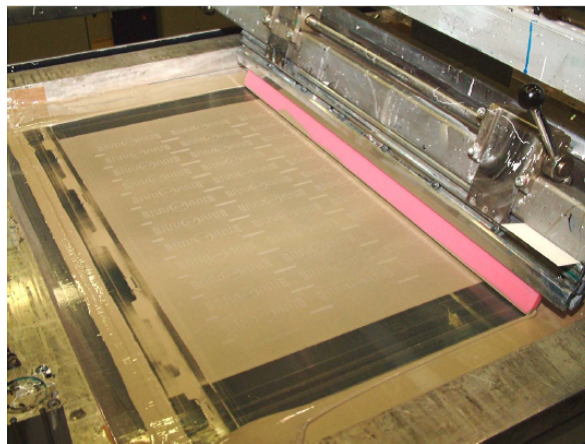


Figura 5.3: Sistema de serigrafia, para impressão de antenas RFID [49]

5.5 Processo de montagem

Os IC são produzidos em *waffles* feitas de silício, um material caro cuja utilização se pretende reduzir. Quanto mais pequeno for o IC, mais ICs serão produzidos numa mesma *waffle*, reduzindo desta forma o preço de produção desses IC, e consequentemente dos ICs. No entanto, a diminuição do chip, aumenta a complexidade da montagem do chip na antena, uma vez que chips muito pequenos não são comumente usados na indústria eletrónica de semicondutores atual. Por estas razões, o processo de montagem é de extrema importância do que diz respeito à produção de *tags* e, consequentemente, ao seu preço.

O sistema robótico *pick-and-place* é muito conhecido na indústria e tem sido vastamente otimizado. No entanto, este processo pode não ser suficientemente rápido, ou eficiente quando aplicado à tecnologia RFID uma vez que os IC, que compõem o sistema RFID, podem ser demasiados pequenos. É então um processo muito usado em pequenas produções, como por exemplo, na prototipagem de etiquetas com especificações especiais.

Outro processo usado é o chamado *fluidic self assembly* da Alien Technology.[3] Neste processo, os ICs estão imersos numa solução líquida e são distribuídos num filme flexível, como por exemplo, o *PET film* (Figura 5.4). A superfície do substrato é moldada com orifícios

preparados para receber os ICs, permitindo que estes fiquem alinhados.[50] Este método tem a grande vantagem de processar rapidamente os ICs, reduzindo assim os custos de produção das etiquetas.

Um dos processos mais usados é o designado *strap*. Esta pequena tira (*strap*) é constituída por pequenos pads e, entre esses pads, apresenta-se já o IC integrado. Estes *straps* depois são colocados nos substratos, já com as antenas impressas, usando uma cola condutora. Os *straps* podem ter cerca de 4 a 8 mm ou mais, tornando-o muito vantajoso para prototipagem, uma vez que estes ser facilmente inseridos à mão.

Este processo é muito usado para produção em massa, uma vez que é um processo muito simples e rápido, conseguindo facilmente velocidades elevadas de ligação de componentes usando o tradicional sistema *roll-to-roll*. Devido às altas velocidades alcançadas consegue-se uma grande redução de custos e, por essa razão, este processo é ainda mais apetecível.

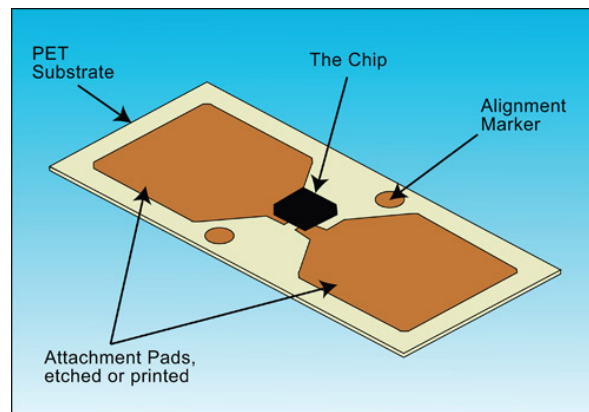


Figura 5.4: Constituição de *tag* RFID UHF. [51]

5.6 Desafio do Design de antenas RFID

Na construção da etiqueta RFID, além de termos em atenção o custo, os processos de fabrico, os diagramas de radiação, a largura de banda, as distâncias de leitura, a flexibilidade, o tamanho das etiquetas, os materiais dos substratos, temos também como grande desafio, o design da antena.

A etiqueta RFID é totalmente passiva, uma vez que não tem bateria ou outro tipo de alimentação disponível. Utiliza a potência eletromagnética transmitida pela antena do leitor para ligar o IC da etiqueta e dessa maneira transmitir de volta para o leitor a informação. Tipicamente os IC necessitam entre 10-30 μW para uma operação normal, mas como o sistema de retificação da energia recebida tem uma eficiência de cerca de 30 %, a antena precisa de captar cerca de 30-100 μW de potência.[3] Por isso, a antena da etiqueta RFID necessita de fornecer energia suficiente ao IC para que este se ligue e funcione corretamente. Para que ocorra a máxima transferência de potência da antena da *tag* para o IC, é muito importante que haja uma correspondência de impedância entre os dois.

Quando a impedância da fonte é puramente resistiva, é bastante fácil de mostrar que a

potência máxima é entregue a uma resistência de carga do mesmo valor, como se pode ver na Figura 5.5.

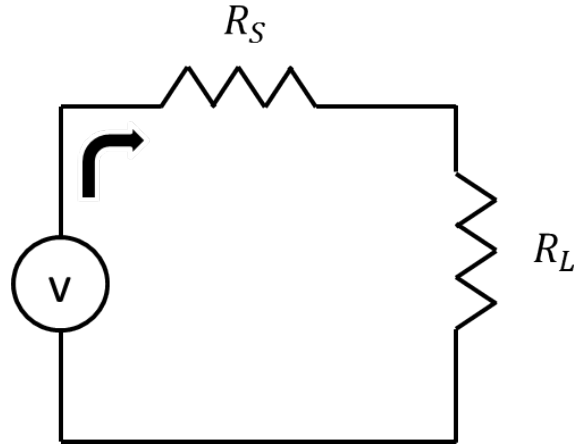


Figura 5.5: Fonte de tensão com resistência da fonte R_S e resistência da carga R_L .

A corrente (I) é obtida pela lei de Ohm:

$$I = \frac{V}{R_S + R_L} \quad (5.1)$$

Em que V é a voltagem e R_S e R_L , as resistências na fonte (do inglês, *source*) e na carga (do inglês, *load*), respetivamente.

A potência dissipada em cada resistência (P_S e P_L , respetivamente, a potência dissipada na fonte e a potência dissipada na carga), pode ser calculada pela equação 5.2:

$$P_S = \frac{V_S^2}{2R_S}; P_L = \frac{V_L^2}{2R_L} \quad (5.2)$$

A partir da lei de Ohm, uma vez que a voltagem em cada resistência é $I \times R$ e a corrente é na fonte e na carga (não tendo mais para onde ir), podemos então expressar da seguinte forma:

$$P_S = \frac{I^2 R_S}{2}; P_L = \frac{I^2 R_L}{2} \quad (5.3)$$

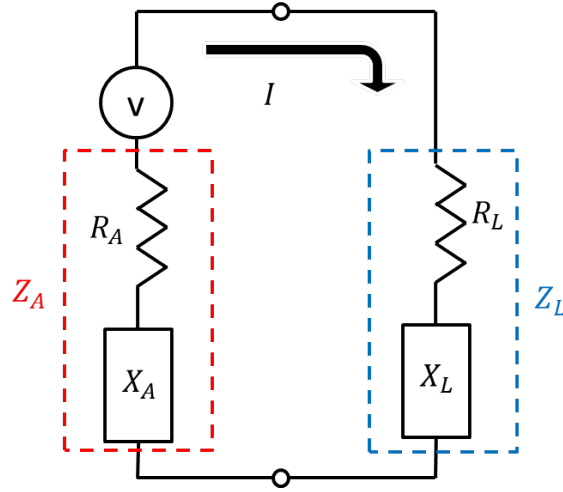


Figura 5.6: Impedância complexa da antena conectada á impedância complexa do IC.

Substituindo a corrente na expressão da potência, obtém-se:

$$P_L = \frac{R_L V^2}{2(R_S + R_L)^2} = \frac{1}{R_S} \frac{(\frac{R_L}{R_S}) V^2}{2[1 + (\frac{R_L}{R_S})]^2} \quad (5.4)$$

No caso mais geral, no qual a fonte e a carga incluem uma reactância - que é uma parte complexa e que é devida a alguma indutância ou capacidade ou os dois - a expressão para a corrente tem ainda a mesma forma mas com uma parte complexa adicionada:

$$I = \frac{V}{(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)} \quad (5.5)$$

$$P_L = \frac{|I|^2 R_L}{2} = \frac{V^2 R_L}{2|(R_S + jX_S) + (R_L + jX_L)|^2} = \frac{V^2 R_L}{2|Z_S + Z_L|^2}, P_t = \frac{1}{2}|I|^2 R_A \quad (5.6)$$

No caso em estudo, a impedância do chip da *tag* Z_L é dada por $Z_L + jX_L$ e a impedância da antena Z_A é dada pela $Z_A + jX_A$. Quando $Z_L = Z_A$, a potência máxima transmitida pela *tag*, P_t , ocorrerá quando as reactâncias da fonte e da carga forem conjugate-matched e canceladas, produzindo a situação da Figure 5.7. É esta condição que normalmente é assumida no cálculo do ganho da antena. Desta maneira, a potência recebida P_R , usando a equação de Friis 5.10 é apenas fornecida ao IC da *tag* de forma máxima quando a condição conjugate-matched se verifica:

$$Z_L = Z_A^* \quad (5.7)$$

$$I = \frac{V}{2R_A} \quad (5.8)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \left| \frac{V}{2R_A} \right|^2 \cdot R_A = \frac{V^2}{8R_A} \quad (5.9)$$

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (5.10)$$

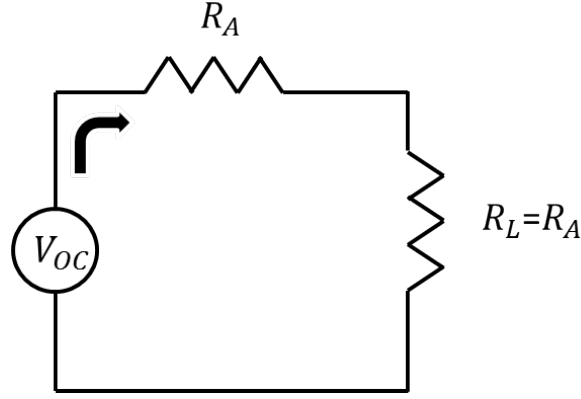


Figura 5.7: *Matching* de impedâncias entre a antena e o IC.

Sendo o G_T e G_R o ganho da antena de transmissão e o ganho na antena de receção, respetivamente, e λ o comprimento de onda.

Quando não existe um *matching* perfeito, a potência fornecida ao IC é inferior à prevista pela equação *Friss*. Podemos usar a equação 5.11 para encontrar a taxa de potência fornecida ao IC em relação à potência máxima que poderia ter recebido de acordo com a equação de *Friss*. O coeficiente de transferência de potência, τ , é então:

$$\tau = \frac{P_L}{P_{Friss}} = \frac{V_{oc}^2 R_L}{2|Z_A + Z_L|^2} \frac{8R_A}{V_{oc}^2} = \frac{4R_L R_A}{|Z_A + Z_L|^2} \quad (5.11)$$

A potência transferida ao IC da tag, e consequentemente o alcance de leitura da tag, serão maximizados quando $\tau = 1$. Quando o coeficiente de transferência de potência é inferior a 1, o alcance de leitura é proporcional à raiz quadrado de τ . Desta forma, o problema relacionado com design da antena da tag relaciona-se com o problema de construir uma antena que forneça um bom *conjugate matching* ao IC.

5.7 Impressão de Antenas com Impressora Jato de Tinta Comercial

Hoje em dia existe uma grande necessidade por parte da indústria no que toca à prototipagem rápida, uma vez que esta tecnologia pode traduzir-se em ganhos significativos em termos de "time to market", e consequentemente em termos de competitividade face a outras empresas. Pela mesma razão, a impressão por jato de tinta pode oferecer imensas vantagens à prototipagem rápida, uma vez que é uma tecnologia barata, rápida, sem necessidade de máscaras, precisa, sem resíduos químicos (amiga do ambiente), permite com facilidade o depósito de várias camadas de tinta e permite fazer impressões em vários tipos de substratos, oferecendo flexibilidade no uso de matérias-primas.

A impressão jato de tinta pode ser dividida em duas categorias principais: contínuas e drop-on-demand (DOD). Este último é o mais comum e consiste na ejeção de tinta somente quando [52], [53]. A impressão jato de tinta DOD pode ser ainda dividida em duas categorias, nomeadamente térmicas e piezoelétricos [52]. A Epson ou Fujifilm Dimatrix são exemplos de marcas que utilizam a tecnologia DOD piezoelétrico e ambas são frequentemente usadas para a impressão de tintas condutoras. Porém, os preços para a impressora Dimatrix DMP-2811 vão desde os USD 35 mil [54]. Um dos objetivos iniciais deste projeto era fazer prototipagem de etiquetas RFID, mas visto que os métodos tradicionais de produção de *tags* RFID não estavam acessíveis, devido aos preços e à acessibilidade a empresas produtoras de *tags* RFID, outras soluções forem encontradas. Uma solução pensada era adquirir uma impressora jato de tinta usada para impressão de tintas condutoras. No entanto, o preço elevado continuou a ser um obstáculo, e por isso uma solução inviável.

Em virtude destas tentativas, e a fim de desenvolver um processo de fabricação mais simples e barato para prototipagem e impressão de etiquetas de RFID, foi adquirida uma convencional impressora jato de tinta e otimizada para ser capaz de imprimir tinta condutora. Para este fim, foi criada uma tinta condutora com propriedades físicas muito parecidas às encontradas nas tintas usadas nas impressoras jatos de tinta. Esta tinta é feita a partir de nano partículas de prata e com solventes baseados em água, etanol, entre outros de maneira a sinterização fosse feita à temperatura ambiente.

As impressoras Epson e Brother foram os modelos escolhidos para se aplicar a tinta desenvolvida, visto serem as impressoras com tinteiros mais facilmente modificáveis. Além disso, são modelos que usam sistema piezoelétrico, ou seja, não criam stress térmico na tinta e possuem a tecnologia Lung, de remoção do ar do tinteiro, da tinta e do seu percurso, impedindo falhas na impressão devido à fuga de tinta nos tubos de passagem.

Como resultados nas impressões, conseguiu-se criar tintas condutoras com 0.25mm e obteve-se condutividades entre 0.2 a 0.6 Ω/sq por square, quando o papel fotográfico e o PET film foram usados como substrato.

Capítulo 6

Implementação de *Tags* RFID UHF

Na implementação do bloco de identificação do sistema de RFID UHF foram projetadas e impressas em substrato de papel fotográfico sete etiquetas RFID passivas, adaptando uma convencional impressora jato de tinta comercialmente disponível. Nos terminais das antenas projetadas, foi usado o IC RFID LXMS31ACNA-010, com uma impedância de entrada de $Z_{in} = 12 + j107 \, \Omega$ a 866.5 MHz e 915 MHz.[55]

As antenas das etiquetas RFID projetadas (exceto as duas *tags* descritas na secção 6.6 (a *tag* Letras e a Kittytag) foram modeladas e simuladas no software de simulação eletromagnética CST Microwave Studio (simulador 3D).[40] Uma vez que este simulador não permite a definição de impedâncias complexas para representar o IC, utilizou-se um condensador em série com uma porta de impedância $12 \, \Omega$. A capacidade equivalente ao chip (C) (1,717 pF em 866,5 MHz e 1.626 pF a 915 MHz) foi calculada usando a equação:

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (6.1)$$

Em que Z_C é a impedância complexa, f é a frequência e C a capacidade.

Como o substrato escolhido foi o papel fotográfico, nas simulações usou-se $\epsilon_r = 2.5$. No entanto, o erro inerente não é muito importante visto que as folhas de papel, por serem muito finas, quase não provocam alterações nas simulações. As *tags* simuladas foram desenhadas e otimizadas para a banda RFID UHF das frequências europeias e das a frequências americanas.

6.1 Tag 1

Numa antena dipolo, como por exemplo, um fio ligado a cada terminal de um chip RFID, a maior parte da corrente flui no centro da antena e a maior parte da carga é armazenada perto dos terminais da antena.[56] Por esta razão, um dos métodos usados para tentar adaptar a capacidade da antena é aumentar a área efetiva nos terminais da antena, aumentando assim a sua capacidade de armazenar mais carga. Com este objetivo, foi usado um dipolo serpenteado no design desta antena para tentar reduzir o seu tamanho e foram adicionadas cargas capacitivas nas extremidades. A Figura 6.1 mostra o layout e o resultado da impressão da tag 1 e na Tabela 6.1 as suas dimensões. Na Figura 6.2 é possível ver os resultados do diagrama de radiação e do S_{11} simulados. Podemos ver que a antena tem um ganho máximo de cerca 1.7 dB ao longo do eixo y, com uma eficiência de 92.07 %.

Parâmetros	a	b	c	d	w
Dimensões (mm)	11	20	6	117,7	1,5

Tabela 6.1: Dimensões dos Parâmetros da Tag 1.

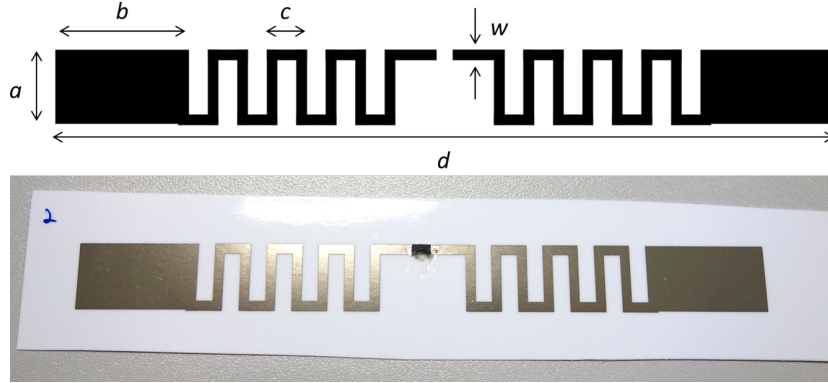


Figura 6.1: Layout e o resultado da impressão da tag 1.

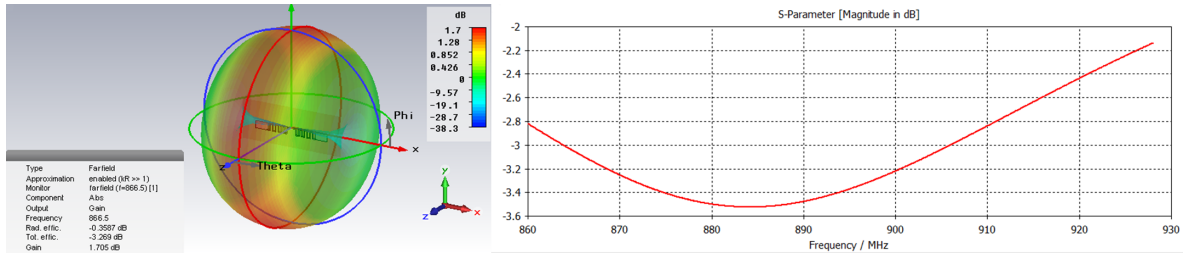


Figura 6.2: Simulação do diagrama de radiação da Tag 1 e a tabela de S_{11} .

Como podemos ver no gráfico dos valores S_{11} , esta *tag* apresenta valores de *return loss* muito elevados, nem mesmo alcançando os -10 dB em toda a banda pretendida (865-928 MHz). O menor valor alcançado na simulação foi de -3.1 dB. No entanto, como o CST é apenas uma ferramenta de auxílio para o design das *tags*, a tag foi impressa e testada experimentalmente.

6.2 Tag 2

No design desta *tag* foi usado um dipolo serpenteado, com um anel indutivo para adaptação de impedância de maneira a estar em concordância com o chip RFID escolhido. A Figura 6.4 mostra o layout e o resultado da impressão da tag 2 e na Tabela 6.2 as suas dimensões. Na Figura 6.3 é possível ver os resultados do diagrama de radiação e do S_{11} simulado. A antena apresentou um ganho máximo de cerca 2.2 dB ao longo do eixo y, com uma eficiência de 86.75 %.

Parâmetros	a	b	c	d	w
Dimensões (mm)	17,6	10	14,3	111,2	2,3

Tabela 6.2: Dimensões dos Parâmetros da Tag 2.

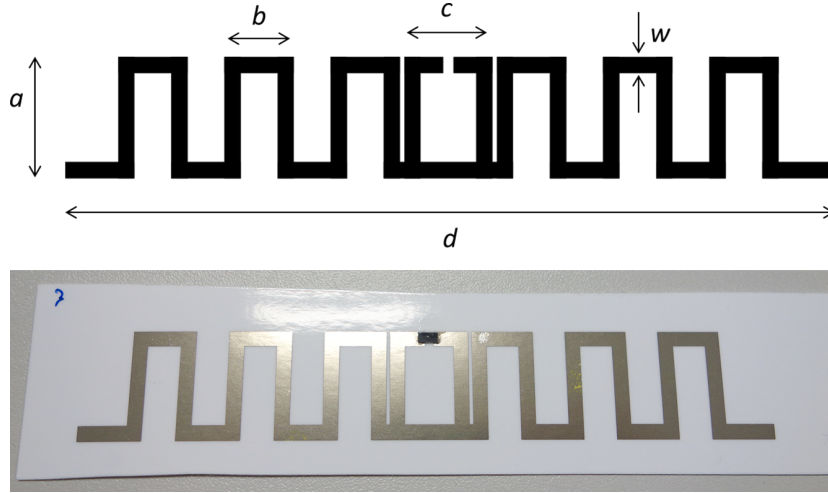


Figura 6.3: Layout e o resultado da impressão da tag 2.

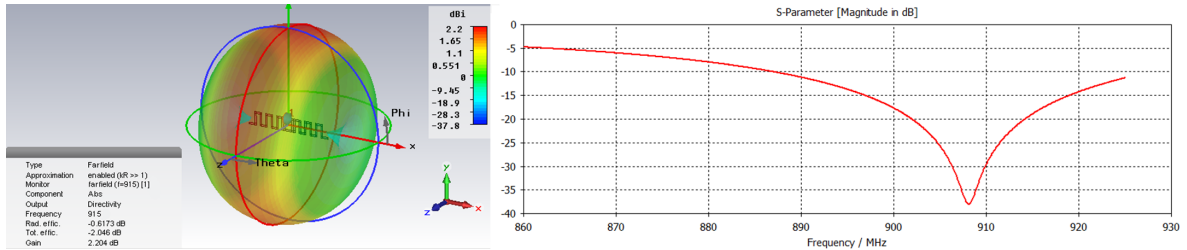


Figura 6.4: Simulação do diagrama de radiação da Tag 2 e a tabela de S_{11} .

Os melhores valores de *return loss* obtidos foram na banda RFID UHF Americana (902-928 MHz), com uma largura de banda de 41 MHz. O menor valor de *return loss* obtido foi de -38 dB a 908 MHz.

6.3 Tag 3

No design desta *tag* foi usado um dipolo serpenteado com um espaçamento maior, com um anel indutivo de adaptação de impedância de maneira a estar em concordância com o chip RFID escolhido. A Figura 6.5 mostra o layout e o resultado da impressão da tag 3 e na Tabela 6.3 as suas dimensões. Na Figura 6.6 é possível ver os resultados do diagrama de radiação e do S_{11} simulados. Podemos ver que a antena tem um ganho máximo de cerca 2.1 dB ao longo do eixo y, com uma eficiência de 91.83 %.

Parâmetros	a	b	c	d	w
Dimensões (mm)	6,2	13,4	6,2	180,3	1,7

Tabela 6.3: Dimensões dos Parâmetros da Tag 3.

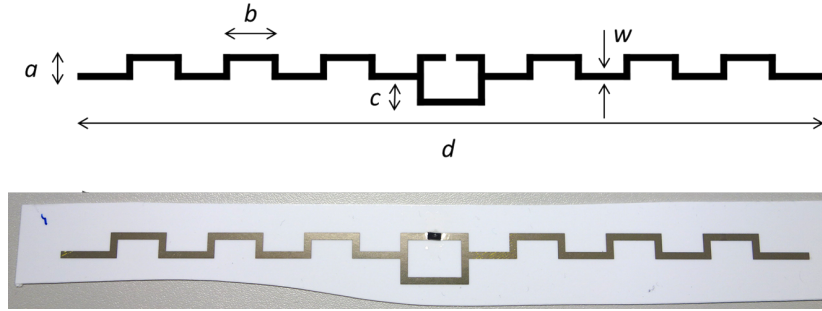


Figura 6.5: Layout e o resultado da impressão da tag 3.

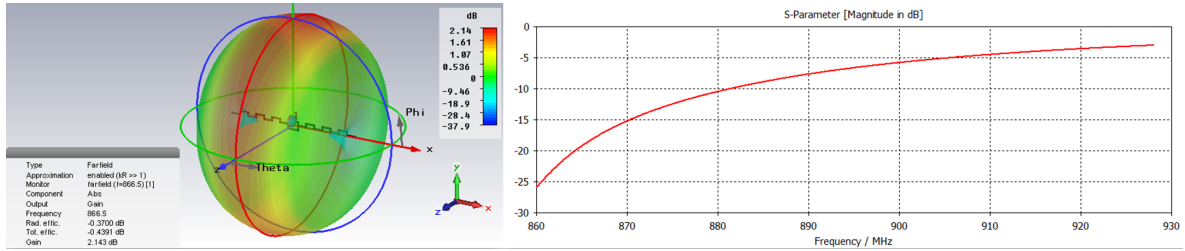


Figura 6.6: Simulação do diagrama de radiação da Tag 3 e a tabela de S_{11} .

Os melhores valores de *return loss* obtidos foram na banda RFID UHF Europeia (865-868 MHz), com uma largura de banda de 21 MHz. O menor valor de *return loss* obtido foi de -26 dB a 860 MHz.

6.4 Tag 4

No design desta tag foi usado um dipolo serpenteado com cargas capacitivas nas extremidades e com um anel indutivo (T-match) de impedância de maneira a estar em concordância com o chip RFID escolhido. A Figura 6.8 mostra o layout e o resultado da impressão da tag 4 e na Tabela 6.4 as suas dimensões. Na Figura 6.7 é possível ver os resultados do diagrama de radiação e do S_{11} simulados. Podemos ver que a antena tem um ganho máximo de cerca 2.3 dB ao longo do eixo y, com uma eficiência de 92.54 %.

Parâmetros	a	b	c	d	e	w
Dimensões (mm)	11,8	12,5	13	138,5	5,4	1,6

Tabela 6.4: Dimensões dos Parâmetros da Tag 4.

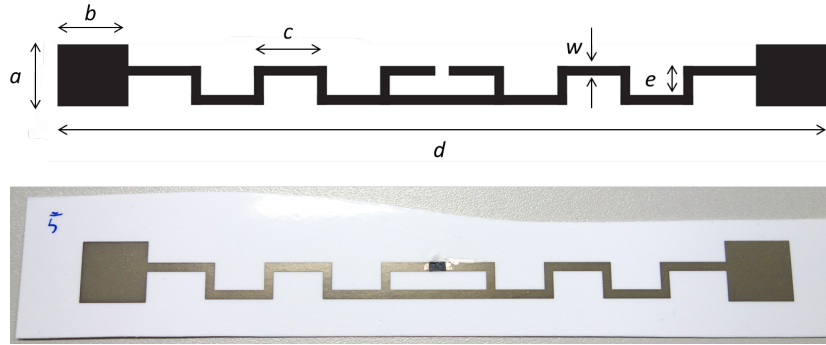


Figura 6.7: Layout e o resultado da impressão da tag 4.

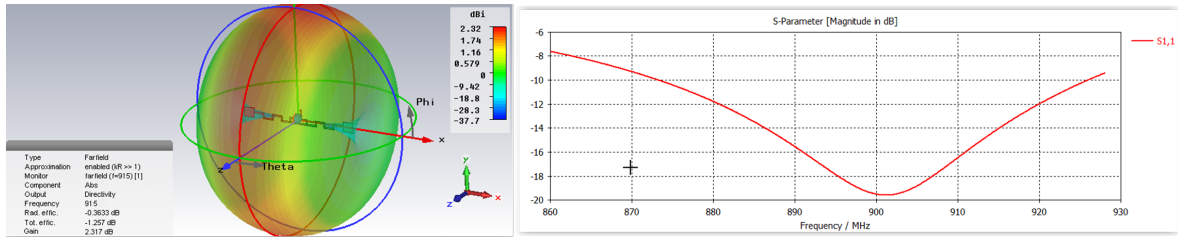


Figura 6.8: Simulação do diagrama de radiação da Tag 4 e a tabela de S_{11} .

Os melhores valores de *return loss* obtidos foram na banda RFID UHF Americana (902-928 MHz), com uma largura de banda de 53 MHz. O menor valor de *return loss* obtido foi de -19.6 dB a 901 MHz.

6.5 Tag 5

No design desta tag foi feito um dipolo serpenteado, com uma caixa de adaptação de impedância de maneira a estar em concordância com o chip RFID escolhido. A Figura 6.2 mostra o layout e o resultado da impressão da tag 5 e na Tabela 6.5 as suas dimensões. Na Figura 6.9 é possível ver os resultados do diagrama de radiação e do S_{11} simulados. A antena apresentou um ganho máximo de cerca 2.3 dB ao longo do eixo y, com uma eficiência de 93.09 %.

Parâmetros	a	b	c	d	w	w2	w3
Dimensões (mm)	11	20	6	117,7	4	1,2	2,1

Tabela 6.5: Dimensões dos Parâmetros da Tag 5.

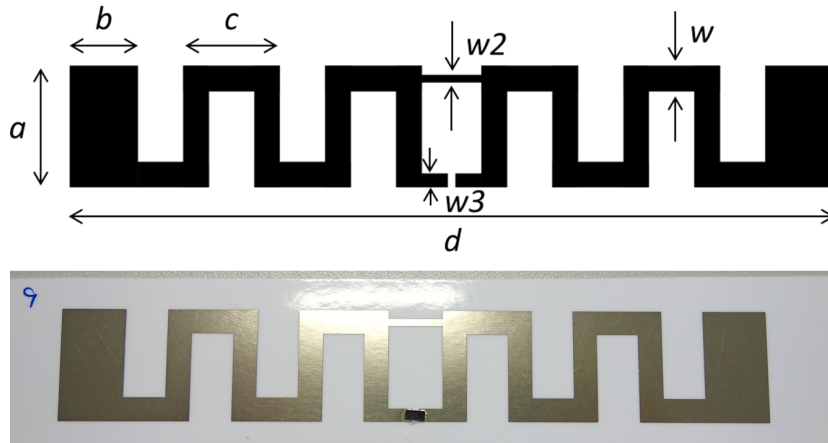


Figura 6.9: Layout e o resultado da impressão da tag 5.

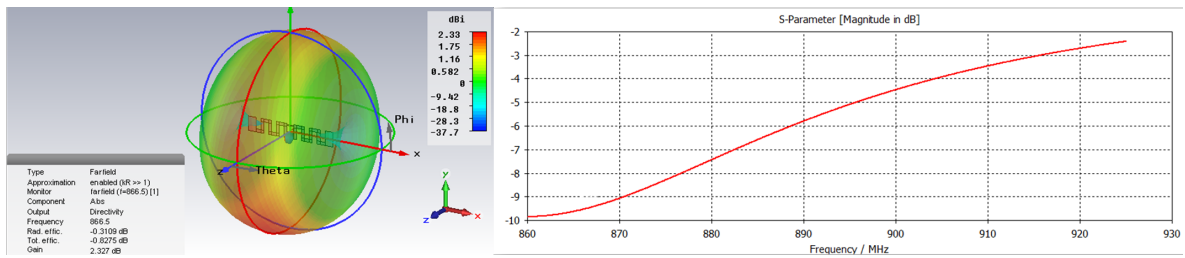


Figura 6.10: Simulação do diagrama de radiação da Tag 5 e a tabela de S_{11} .

Os melhores valores de *return loss* obtidos foram no limiar dos -10 dB cobrindo a banda RFID UHF Europeia (865-868 MHz).

6.6 Tag letras e kittytag

Estas *tags* foram projetados com a forma de dois logótipos que representam uma marca de empresa e um produto (IT - Instituto de Telecomunicações e Hello Kitty , respetivamente). O objetivo do design desta tag foi estudar a possibilidade de criar antenas impressas com tinta condutora com a forma de logótipos de marcas. Isto permitirá o uso de uma tag RFID numa embalagem/produto sem alterar o design gráfico/estética do mesmo. A Figura 6.11 e 6.12 mostra o layout e o resultado da impressão da tag letras e kittytag.

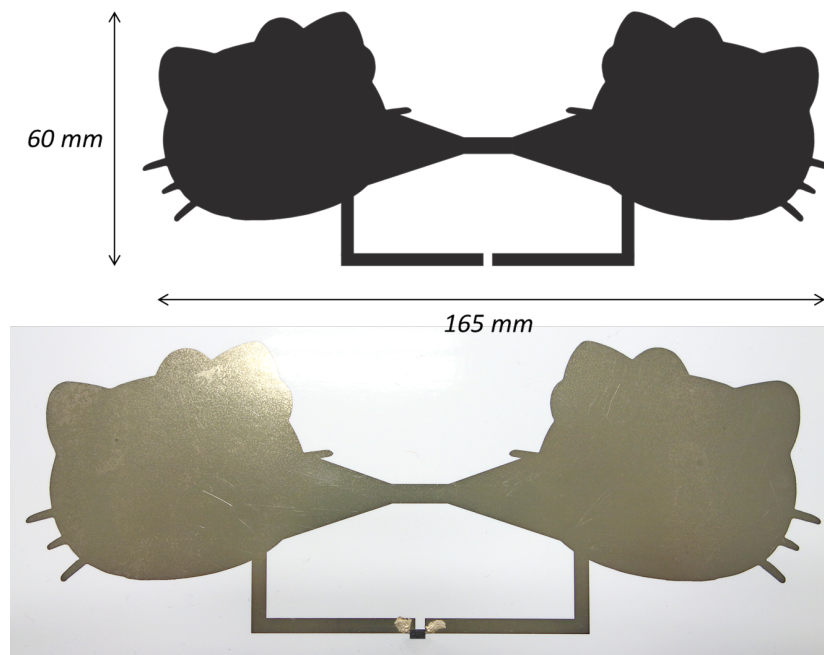


Figura 6.11: Layout e o resultado da impressão da tag kittytag.

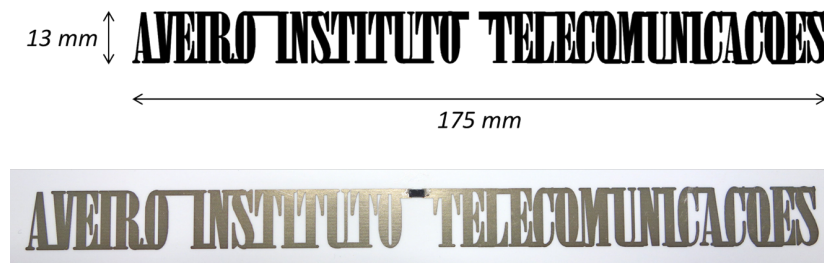


Figura 6.12: Layout e o resultado da impressão da tag letras.

6.7 Resultados Experimentais

Depois de desenvolvidas e testadas computacionalmente (no caso das *tags* para as quais testes computacionais foram possíveis), todas as *tags* foram testadas experimentalmente, pela medição dos seus alcances de leitura. Para esta finalidade, foi usado o leitor Mercury6e EPC Gen2 da ThingMagic, operando com uma potência de saída de 30 dBm nas bandas de frequência Americana e Europeia. Uma antena circular foi ligada ao leitor da mesma marca com cerca de 6 dBi de ganho. A Tabela 6.6 são apresentados os resultados obtidos.

Tags	Distância de leitura (m)
1	6,3
2	7,1
3	7,4
4	12,2
5	7,3
6 (kittytag)	6,1
7 (letras)	1,1

Tabela 6.6: Distâncias de leitura obtida nas tags.

A *tag* 4 apresentou o melhor desempenho em termos de distância de leitura e a *tag* 7 (*tag* Letras) o pior. A causa para a baixa distância de leitura conseguida pela *tag* 7 poderá ser devido à desadaptação de impedância criada pelas inúmeras arestas nos formatos das letras. Mesmo assim, tanto a *tag* 7 como a *tag* 6 (Kittytag) funcionam corretamente, confirmando sua utilidade em processos de prototipagem baratos, simples e rápidos.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusão

Esta dissertação de mestrado assumiu como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um sistema de RFID UHF reconfigurável e de baixo custo. Para este fim, foram estabelecidos três objetivos.

O primeiro objetivo desta dissertação foi construir um *Front End* de radiofrequência robusto e de baixo custo para as bandas de frequência RFID UHF Americana e Europeia. Após o estudo das arquiteturas de transmissão e recepção de rádio, procedeu-se ao desenvolvimento/desenho de um *front end* que fosse facilmente integrado numa DSP ou FPGA com processador embutido. Desta forma, era esperado obter um *front end* reconfigurável a novos protocolos de comunicação, novas *tags* e até a alterações de frequências, colmatando assim as limitações de leitores baseados em RFID IC *transceivers*. O *front end* desenvolvido foi desenhado de forma a reponder às necessidades de um *front end* RFID uhf sendo por isso composto por sete blocos principais, desmodulador, modulador, PLL, amplificador de potência, filtros, ADC e DAC. Como segundo objetivo, pretendeu-se desenhar e construir duas antenas para leitores RFID: uma para a banda RFID UHF Americana e outra para banda RFID UHF Europeia, com boa performance, de custo reduzido e de fácil produção em massa. Inicialmente, fez-se um estudo teórico dos parâmetros das antenas, dando especial atenção às antenas microstrip, bem como aos métodos de alimentação e técnicas de polarização circular.

As antenas foram desenhadas, simuladas e otimizadas. Depois de realizadas as simulações e otimizações, as antenas que mostraram ter os parâmetros adequados, foram construídas e foram feitos testes experimentais, medindo os mesmos parâmetros que foram simulados, por forma a validar o nosso modelo computacional e confirmar a eficiência das antenas. A antena desenhada para a banda RFID UHF americana, apresentou uma boa adaptação de para os 915 MHz. Esta antena apresentou bons valores experimentais em termos de diagrama de radiação e ganho. No entanto, o seu axial ratio foi elevado, e por esta razão, não foi conseguida uma polarização circular como era pretendido, obtendo-se em vez disso uma polarização elíptica. Foi desenhada também uma antena RFID UHF para a banda Europeia. Visto que não foram atingidos dos os requisitos na antena mencionada anteriormente, pretendeu-se desenvolver uma antena que além de funcionar na banda RFID UHF Europeia também tivesse largura de banda suficiente para abranger também a banda de frequência RFID UHF Americana. Esta antena apresentou uma boa adaptação para as bandas de frequência RFID UHF Americana e Europeia, tendo também bons valores experimentais em termos de diagrama de

radiação, ganho e polarização circular. Todos os parâmetros simulados foram confirmados experimentalmente, confirmando o potencial do modelo numérico.

O terceiro objectivo foi desenvolver *tags* passivas, em material orgânico e flexível, como é o caso o papel, usando um processo de produção de baixo custo. Foi feito um estudo sobre os desafios do design de *tags* RFID, assim como, um estudo sobre a importância dos custos das mesmas. Os tipos de substratos, em particular à base de papel e algumas técnicas de fabricação de *tags* foram também abordadas nesta dissertação. Para imprimir as antenas das *tags* RFID em papel fotográfico, foi alterada uma impressora jacto de tinta convencional, comercialmente disponível, e foram feitas alterações na tinta de impressão de forma a torná-la condutora. Cinco *tags* foram projetadas e simuladas para avaliar o desempenho de diferentes designs para ter a máxima performance possível no que toca à distância de leitura. Estas *tags* foram impressas em substrato de papel fotográfico, usando a impressora modificada, e testadas experimentalmente. Adicionalmente, duas tags (tag 6 e tag 7), cujos designs correspondem a logótipos que representam marcas de produtos/empresas, foram impressas, pelo mesmo método, e foi testada a potencialidade para poderem ser usadas como rótulos e integradas em produtos. A impressora desenvolvida neste projeto demonstrou ser eficiente na impressão de *tags* de RFID. Com base nos nossos resultados, a tag 1 apresentou o melhor desempenho em termos de distância de leitura e a etiqueta 7 o pior. A causa para a faixa de leitura ter sido a mais baixa na etiqueta 7 pode ser devido a uma má adaptação de impedâncias. Mesmo assim, ambas as tags, a 6 e a 7 funcionaram corretamente quando testadas experimentalmente, confirmando a sua utilidade em processos de prototipagem baratos, simples e rápidos. Estes resultados sugerem que é possível manter as formas dos logos quando integrados em produtos comercialmente disponíveis em etiquetas de RFID, confirmando a nossa hipótese.

Este projeto é, assim, um primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema RFID de baixo custo e reconfigurável. No futuro, pretende-se utilizar os componentes aqui desenvolvidos e o conhecimento adquirido para projetar um sistema completo de RFID cumprindo os requisitos aos quais nos propusemos.

7.2 Trabalho Futuro

No que respeita a melhoramentos, podem passar por:

- Integração do *Front End* desenhado neste projecto com uma DSP ou FPGA com o objectivo de construir um leitor RFID UHF configurável.
- Estudo e teste de *tags* RFID *chipless*, para substituição de códigos de barra, usando o sistema de impressão criado neste projeto.

Anexos

Anexo A

1ª Conferência URSI AT-RASC (Atlantic Radio Science Conference), 2015

Assessing the performance of inkjet-printed coils on paper substrate for WPT

Hugo Miranda^{*(1)}, Rómulo Antão⁽²⁾, Hélder Machado⁽¹⁾, Ana Rita Ferreira⁽¹⁾,
João Nuno Matos⁽¹⁾, Rui Escadas⁽²⁾

(1) Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

(2) IEETA, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

Abstract

The sprawl of the Internet-of-the-Things created a high demand for seamless ways of powering and charging small embedded systems. Wireless Power Transmission (WPT) systems based on inductive coupling seem to be a viable solution to accomplish this goal due to its power delivery capability and reduced form factor. This work aims to assess the potential of using a conductive inkjet printing systems for cheaper and faster manufacturing of WPT inductively coupled coils on paper substrate designed to operate within the 13.56 MHz ISM band.

Introduction

The number of small electronic devices that are present in our daily life has increased significantly in the recent years. Typically they are powered by batteries, which are seen as the critical barrier to achieve troubleless operation. Recently, more attention is given to Wireless Power Transmission (WPT) as a means to either replace batteries or ease their charging procedure and to increase the market value of such devices.

WPT systems are a class of electronic devices intended to transmit electrical power without using wires. While WPT is a feature already present in several low power devices, for the majority of applications the losses imposed by transmission and distribution stages still lag behind the values obtained with cabled systems. However, it is believed that in forthcoming years WPT can become more efficient and a valid short-range charging/powering alternative for products such as mobile phones, laptops, integrated circuits, medical devices and other passive sensors where cables are often seen as a trammel.

WPT designs can be implemented based on different approaches: via radio waves, especially microwaves; using resonance coupling; using inductive coupling. Considering the transmission systems based on radio waves, their underlying principles are shared with the theoretical background and design principles of wireless communicating devices. By using an antenna for a transmitter and a rectifying antenna (*rectenna*), conversion efficiencies exceeding 90% have been achieved [1]. However, it is well known that physical dimensions of the devices involved in the power transmission process in the previously referred approach hinder the application of those technologies in small size-form devices. Another frequently used approach for WPT is based on resonant coupling between objects. According to the Coupled Mode Theory (CMT) [2], two objects of the same resonant frequency tend to efficiently exchange energy while interacting weakly with peripheral off-resonant objects. The theory underlying resonant inductive coupling technology is flexible enough to adjust the design of transmitting and receiving coils in order to cope with the limitations of smaller electronic devices [3]. However, this advantage imposes a trade-of relation between the dimensions of the coil and its gain and directionality. Nevertheless, inductive coupling offers several advantages as simple design, lower frequency operation and low cost, being well suited for short distance applications.

An important feature of inductive coils based designs is the different type of materials that they can be build upon. Since WPT will have a high impact in the consumer market, the cost and the environmental footprint of this technology is an important factor to be considered. The use of

renewable, environmental-friendly materials, such as wood or paper, is expected to become a growing trend [4], making the integration of electronics and such materials an interesting research topic.

Inkjet printing is a technique to produce printed circuit boards on a paper substrate. By using highly conductive inks in a desktop inkjet printer one can foresee a large amount of applications that can significantly benefit from the readiness and reduced cost of such approach. In the consumer market, the costs in deploying RFID tags can be significantly reduced by printing labels directly on paper-based substrates or space constrained circuitry can be directly printed in different types of flexible substrates. Additionally, inkjet printing may also radically transform the way one can develop and test a new prototype circuit, decreasing the project design time and also the costs of development.

Being a promising technology, conductive inkjet printing only very recently gathered the attention of a broader audience and still has to prove its applicability in real circuits. The present work aims to assess its potential for cheaper and faster manufacturing of WPT inductively coupled coils on paper substrate designed to operate within the 13.56 MHz ISM band.

Coil Design

To evaluate the WPT capabilities based on coupled inductors, six planar square air core inductors were printed in paper substrate using inkjet technology. Inkjet printing offers great advantages over other methods of printing since it does not require any prefabrication of templates or any post-printing steps due to its precise method of patterning. Epson and Fujifilm Dimatrix are examples of brands using piezoelectric Drop-on-Demand technology to produce designs based on conductive inks [5]. However, due to the high cost of these systems, their adoption has been slow and their use is still restricted to specific applications. In order to develop a more simple and cheaper manufacturing process based on this technology, a commercially available printer was modified to use a special ink based on silver nanoparticles.

Regarding the coil design, it can be specified for a given shape by its number of turns (n), the track width (w), the spacing between turns (s), the outer diameter (d_{out}), the inner diameter (d_{in}) and its fill ratio given by $\rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in})$. As it is pointed in [6] and was experimentally observed in several evaluations using the inkjet printing technology, the thickness of the inductor (which is dependent on the number of successive printed layers) doesn't affect the inductance significantly. Therefore, this parameter was not considered as a design parameter. In table 1 the parameterization of each air core inductor under test is presented, being the corresponding layout depicted in Figure 1. The theoretical inductance values were calculated using the Modified Wheeler Formula [6]. The capacitance values presented in Table 1 are the ones to tune the circuit (at 13.56MHz).

Table 1 - Coils dimensions and corresponding resonance capacitor

Coil	n	w (mm)	s (mm)	d_{out} (mm)	d_{in} (mm)	ρ	L (nH)	C (pF)
1	3	3.5	2	65	36	0.287	746.80	184
2	3	3.5	2.5	65	34	0.313	703.90	195
3	4	3	1	65	35	0.300	1289.10	106
4	3	3.5	1.5	65	38	0.262	792.00	173
5	3	3	3	65	35	0.300	725.06	189
6	3	2	3	65	41	0.226	864.41	158

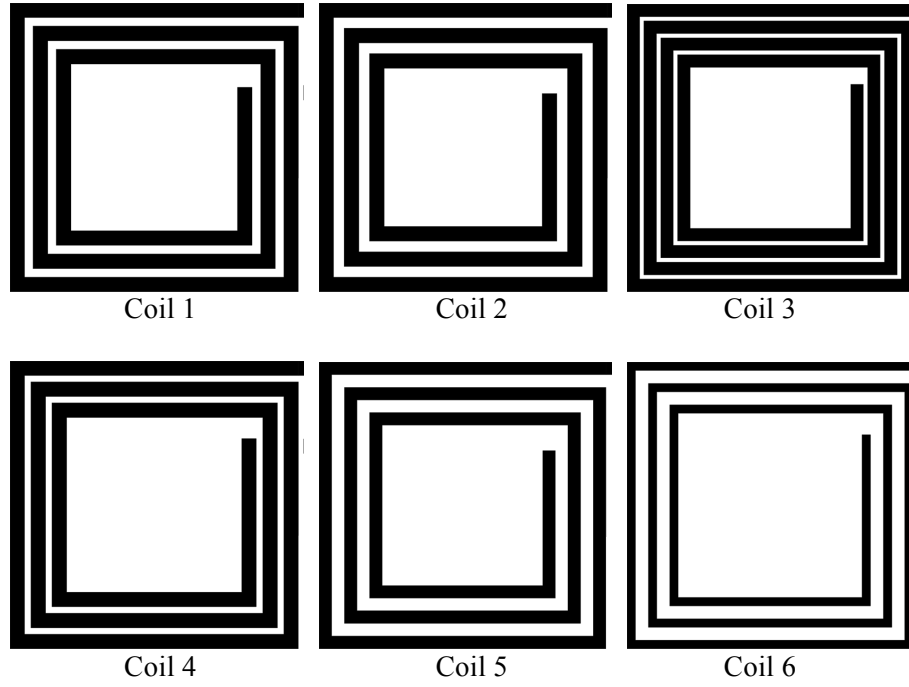


Fig. 1 – Layout design for the 6 different coils.

Experimental Results

To evaluate the performance of the inkjet printed air core inductors on paper substrate for wireless power transmission applications, an experimental setup was implemented. Figure 2 depicts the setup of the receiver circuit, where L1 represents the coil under test, R1 is the parasitic resistance of the coil tracks and C1 is a tuning capacitor for the intended working frequency (ISM band – 13.56MHz). Its theoretical value is indicated back in Table 1. However, as the coil and the oscilloscope connection introduce themselves a parasite capacitance, C1 is a variable capacitor for fine adjusting the resonance peak to the transmission frequency, in order to optimize the received power. The resistor R2 serves as load - in the present setup, the values of 10k Ω and 100 Ω were used.

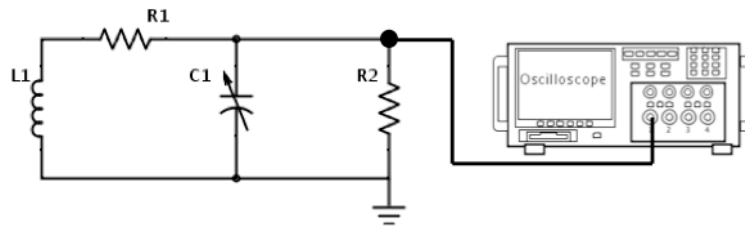


Fig. 2 – Schematic of the reader circuit.

A function generator with 50 Ω output impedance serves as the power source, generating a 10V_{pp} at 13.56MHz signal into a transmission coil slightly larger than those under test (also planar and with square geometry) as parameterized in Table 2.

Table 2 – Transmission coil parameters

	n	w (mm)	s (mm)	d _{out} (mm)	d _{in} (mm)	ρ	L (nH)
TX Coil	3	3	2	75	49	0.2096	1040

In Figure 3, two graphics depicting relationship between the received power and the distance to the receiver for two different loads (the transmitter and receiver coil planes being parallel).

The analysis of the graphics show that the coils 3 and 4 have the best performance due to the higher received power levels on both load conditions. Despite existing a clear relation between the number of turns and the fill ratio of each coil and the efficiency of the energy transfer process, at the farthest evaluated distance every coil shown capable or delivering significant power at a voltage level easily managed by the most recent energy harvesting circuits [7]. Considering the results obtained with the 100 Ω R2 resistor, which shown the highest levels of harvested power, at the distance of 5cm the worst performing receiving coil was still able to deliver 0.42 V RMS to the load resistor. This result proves the applicability of poor coupled contactless wireless power transmission (WPT) systems using inkjet printed coils on paper.

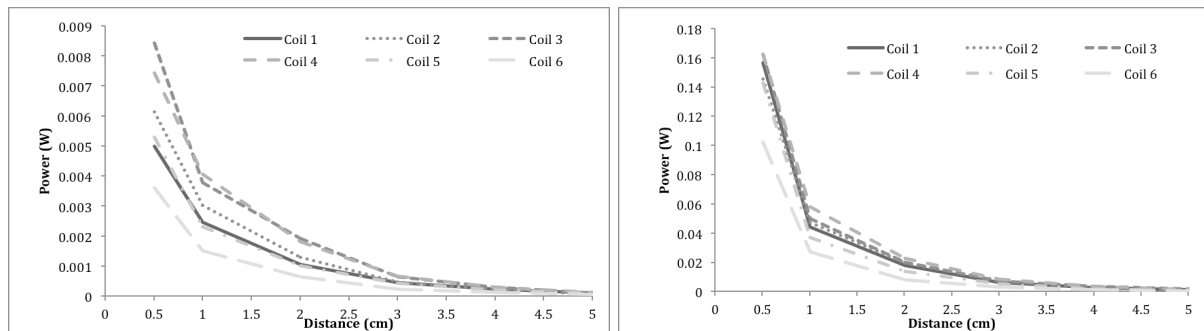


Fig. 3 – Received power of each coil for different distances to the transmitter: 10k Ω load (on the left) and 100 Ω (on the right).

Conclusions

As low-cost sensor systems and other small electronic devices become more and more present in our life, it is becoming mandatory to find cheap, simple and environmentally friendly alternatives to batteries. In this paper an inductive power transfer link using a receiver implemented by a low-cost ink-jet printed circuit on paper substrate was presented. Different coils with various widths and spacings were designed for comparison and to evaluate the design choices' influence in power transmission capabilities. Although preliminary, the achieved results with the proposed WPT shown that it is viable to use the presented technology for such purpose, more particularly in cost sensitive applications where the powered systems are often considered disposable or have a reduced expected lifetime. Printing the receiver coils directly on paper substrate can become a task as simple as printing a bar-code tag and so significantly reducing the costs involved in the deployment of radio frequency circuits.

References

- [1] A. Mehdipour, et al., "Investigating the Different Wireless Power Transmission Systems," Proc. of the Intl. Conf. on Advances in Electronics, Electrical and Computer Science Engineering – EEC 2012, pp. 235-239, 2012.
- [2] H.A. Haus, W. Huang, "Coupled Mode Theory," IEEE Proceedings, vol. 79, pp. 1505-1518, 1991.
- [3] F. C. Flack, E. D. James, and D. M. Schlapp, "Mutual inductance of air-cored coils: effect on design of radio-frequency coupled implants," Med. Biol. Eng., vol. 9, no. 2, pp. 79–85, Mar. 1971.
- [4] J. Virtanen, et al., "Inkjet-Printed UHF RFID Tags on Renewable Materials," Advances in Internet of Things, 2012, 2, 79-85, 2012.
- [5] A. Rida, Conductive Inkjet Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WNS Applications, Master Thesis MIT, 2009
- [6] S. S. Mohan, M. Hershenson, S. P. Boyd and T. H. Lee, "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances," IEEE Journal of Solid-State Circuits, pp. 1419-24, 1999.
- [7] P. Nintanavongsa, A survey on RF energy harvesting: circuits and protocols, Energy Procedia 56, 414 – 422, Elsevier, 2014

Anexo B

Front End de RF

No presente anexo são apresentados os esquemas elétricos dos circuitos desenvolvidos, layout das placas, uma fotografia da placa final e o preço dos componentes.

B.1 Desmodulador IQ LT5575

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	3,05
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	11,28
IC principal	10,65
PCB	11,78
Total	36,76

Tabela B.1: Preço dos componentes da PCB do desmodulador IQ LT5575.

Figura B.1: Esquema elétrico da placa do Desmodulador IQ LT5575.

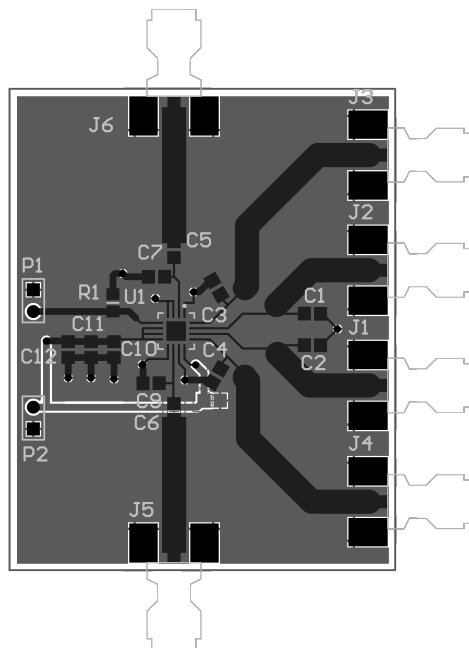


Figura B.2: *Layout* da camada superior da placa do Desmodulador IQ LT5575.

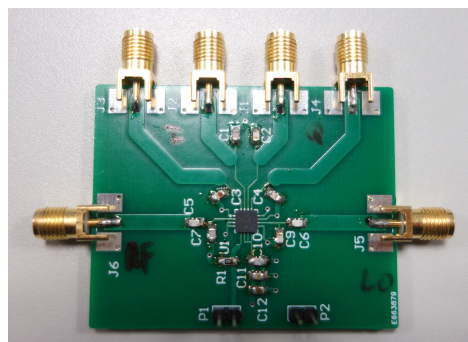


Figura B.3: Fotografia da camada superior da placa do Desmodulador IQ LT5575.

B.2 Sintetizador de RF ADF4351

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	3,04
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	11,28
IC principal	10,65
PCB	12,45
Total	37,42

Tabela B.2: Preço dos componentes da PCB do sintetizador de RF ADF4351.

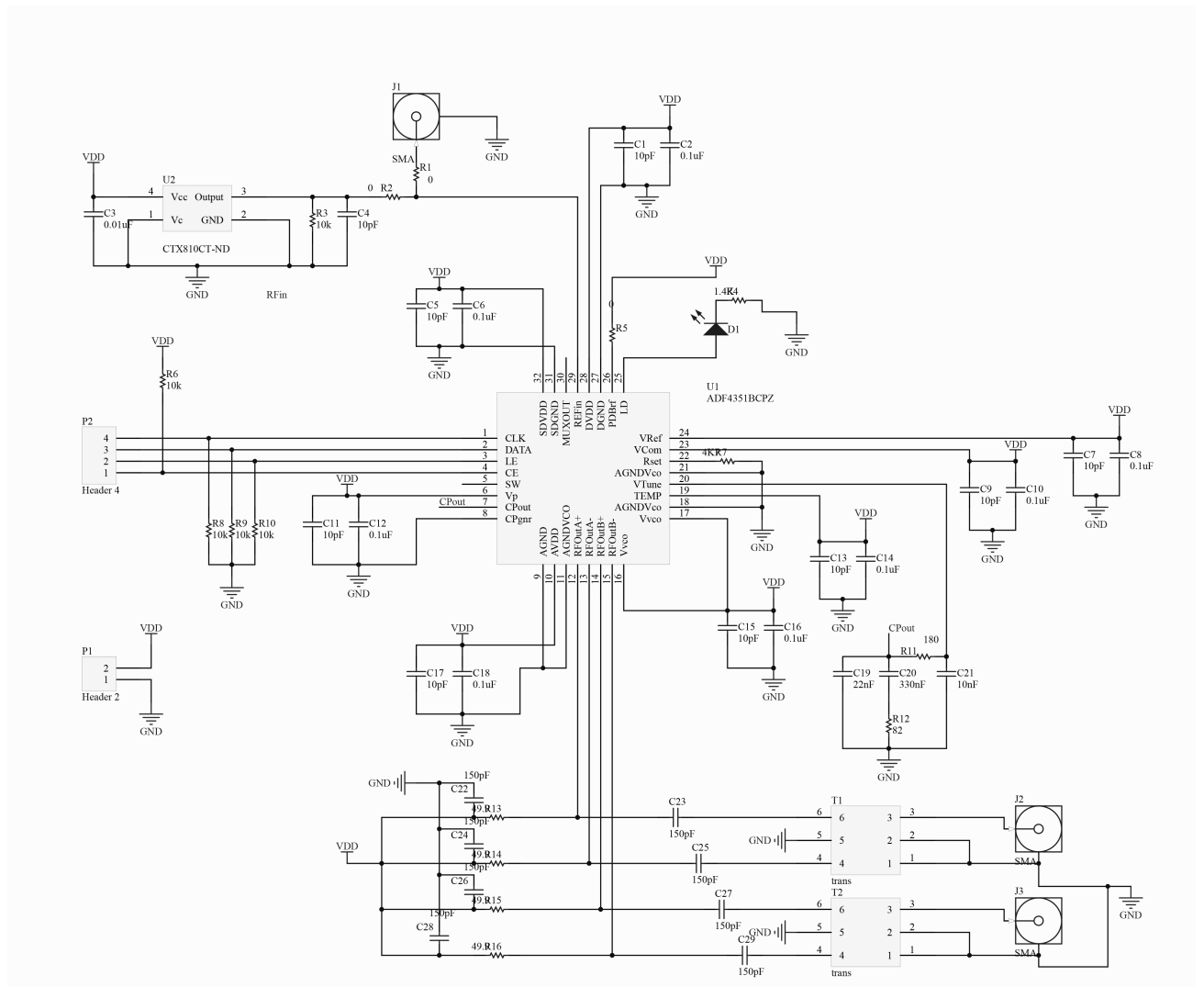


Figura B.4: Esquema elétrico da placa do Sintetizador de RF ADF4351.

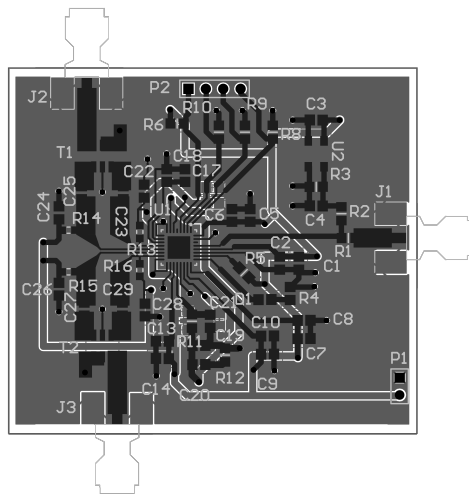


Figura B.5: *Layout* da placa do Sintetizador de RF ADF4351.

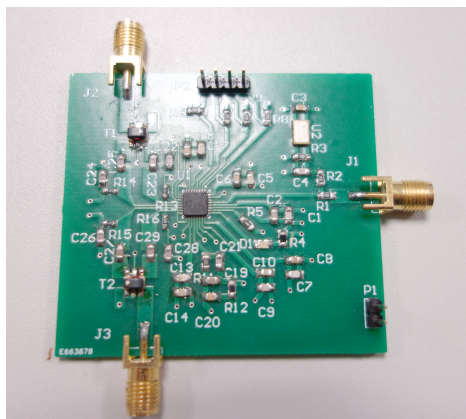


Figura B.6: Fotografia da camada superior da placa do Sintetizador de RF ADF4351.

B.3 Modulador IQ LT5568

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	0,1
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	12,42
IC principal	2,92
PCB	10,78
Total	26,22

Tabela B.3: Preço dos componentes da PCB do modulador IQ LT5568.

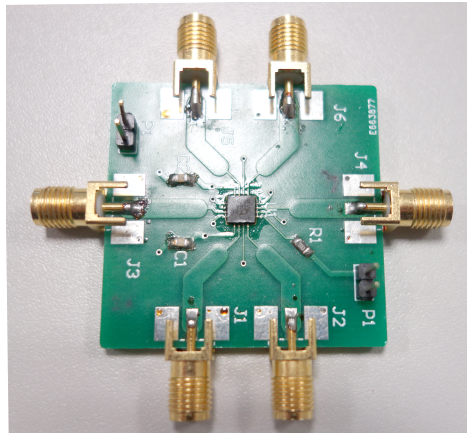


Figura B.9: Fotografia da camada superior da placa do Modulador IQ LT5568.

B.4 Filtro B3717 e Filtro B3588

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	-
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	4,14
IC principal	1,8
PCB	0,5
Total	6,44

Tabela B.4: Preço dos componentes da PCB do filtro B3717 ou B3588.

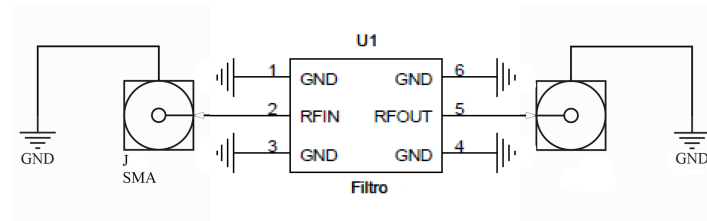


Figura B.10: Esquema elétrico da placa para os filtros B3717 e B3588.

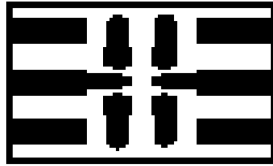


Figura B.11: *Layout* da placa para os filtros B3717 e B3588.

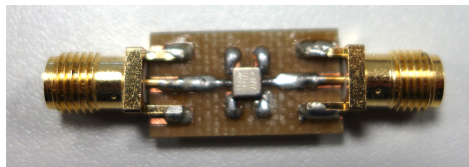


Figura B.12: Fotografia da camada superior da placa do filtro B3717.

B.5 Amplificador de Potência

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	2,39
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	4,29
IC principal	2,44
PCB	-
Total	9,12

Tabela B.5: Preço dos componentes da PCB do amplificador de potência.

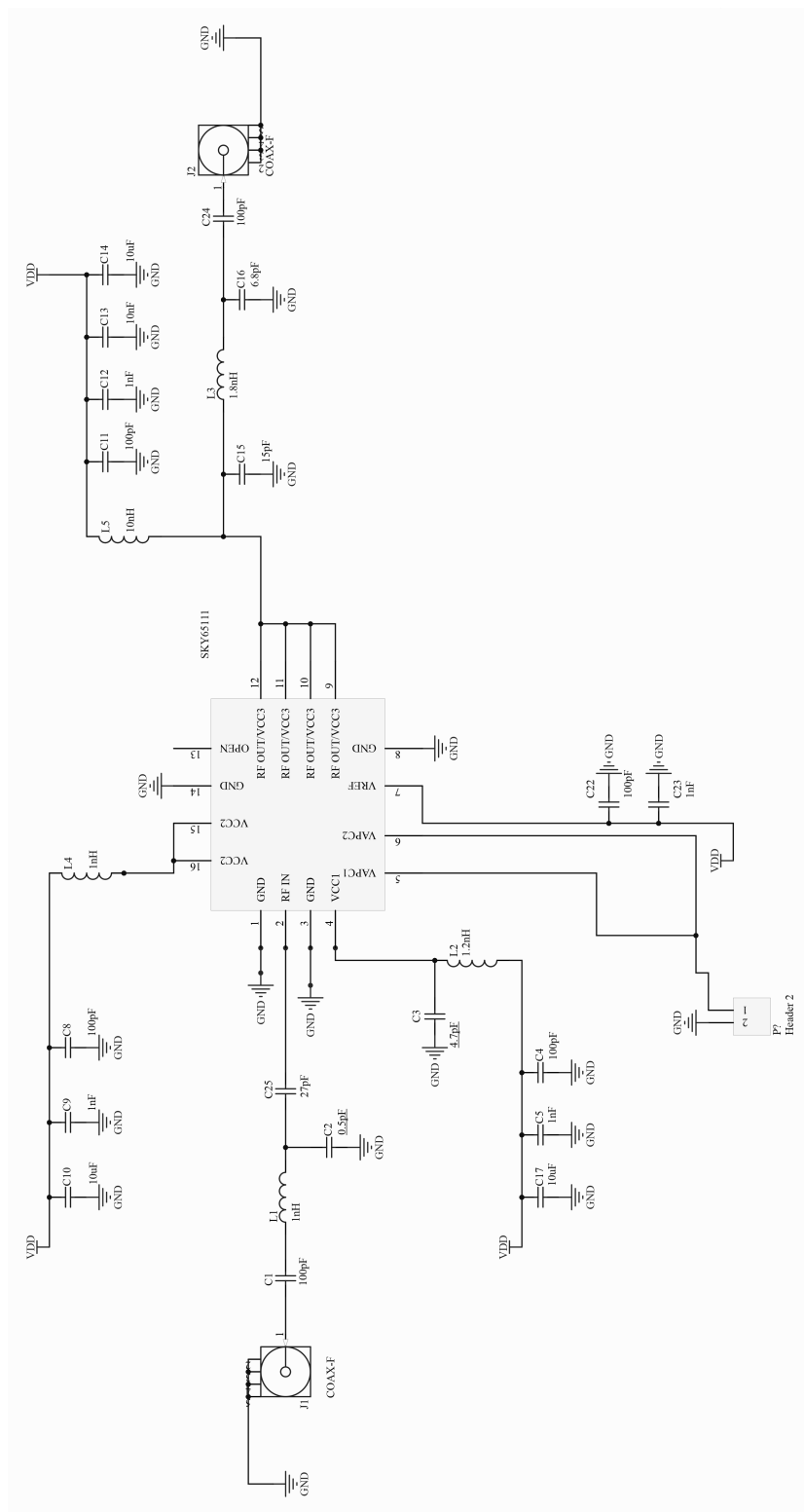


Figura B.13: Esquema elétrico da placa para o Amplificador de Potência SKY65111.

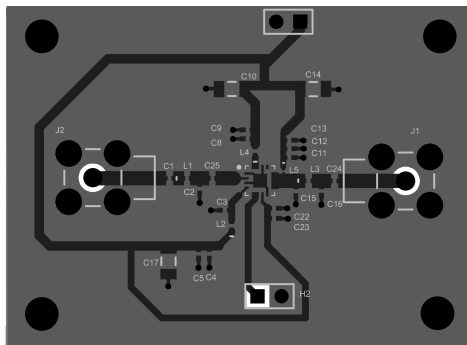


Figura B.14: *Layout* da placa para Amplificador de Potência SKY65111.

B.6 ADC e DAC

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	0,56
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	18,63
IC principal	11,61
PCB	1,5
Total	32,3

Tabela B.6: Preço dos componentes da PCB da ADC e DAC.

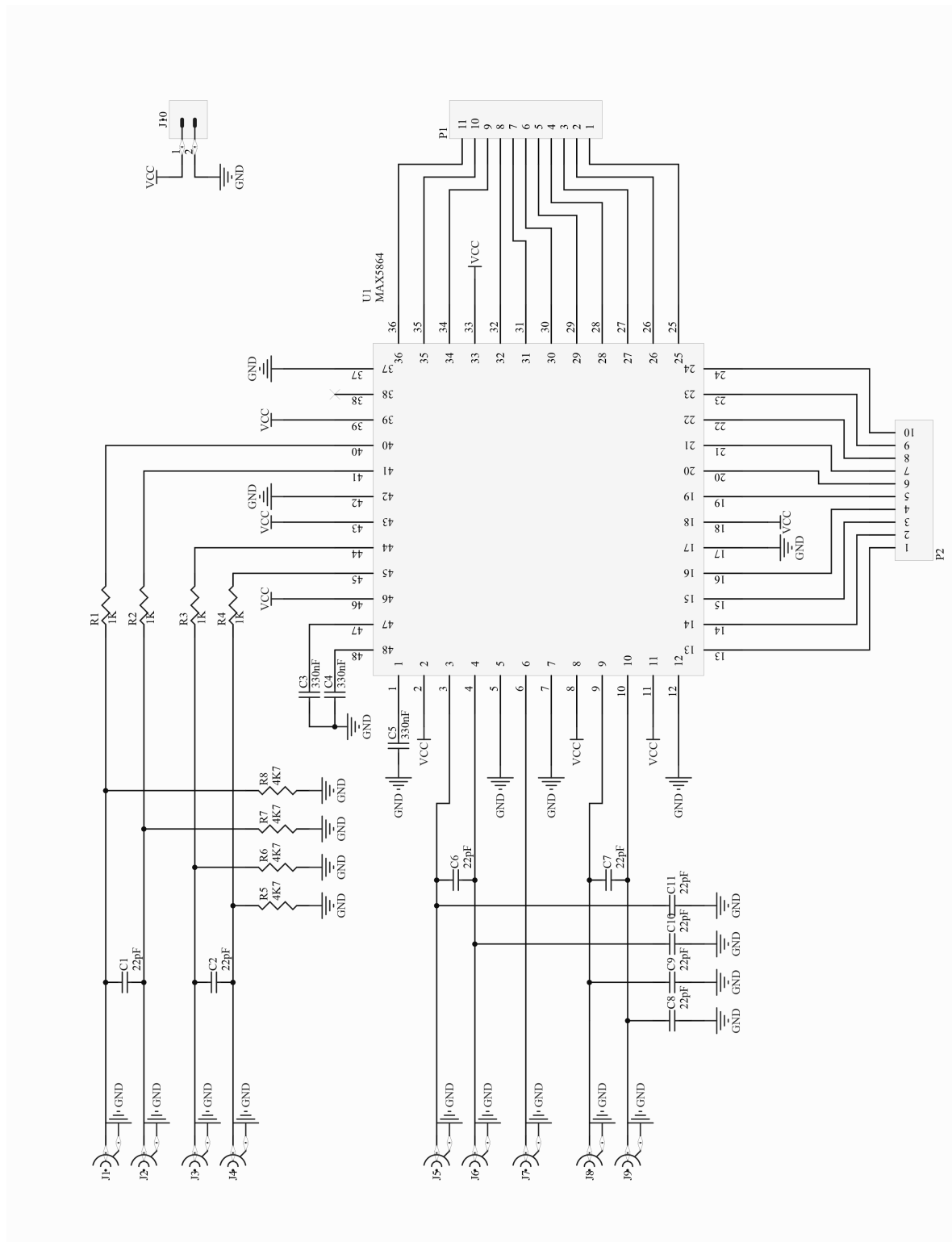


Figura B.15: Esquema elétrico da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864.

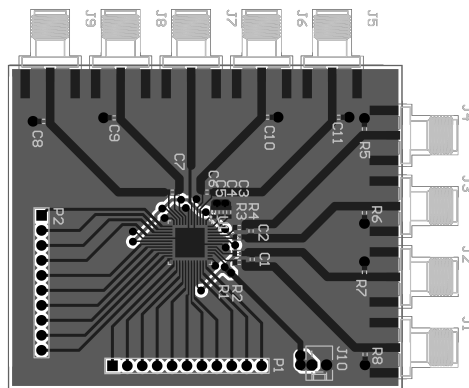


Figura B.16: *Layout* da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864.

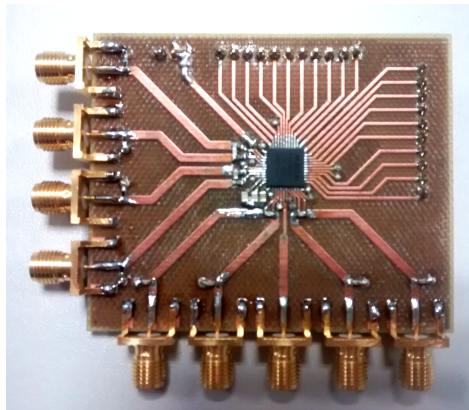


Figura B.17: Fotografia da camada superior da placa da ADC e DAC baseada no MAX5864.

B.7 Programador auxiliar do sintetizador, PIC18LF2550

	Preço em euros para pequenas quantidades
Componentes discretos (condensadores, resistências, indutores)	1,58
Outros componentes (conectores sma, osciladores, etc)	0,32
IC principal	4,20
PCB	3
Total	9,1

Tabela B.7: Preço dos componentes da PCB do programador auxiliar do sintetizador, PIC18LF2550.

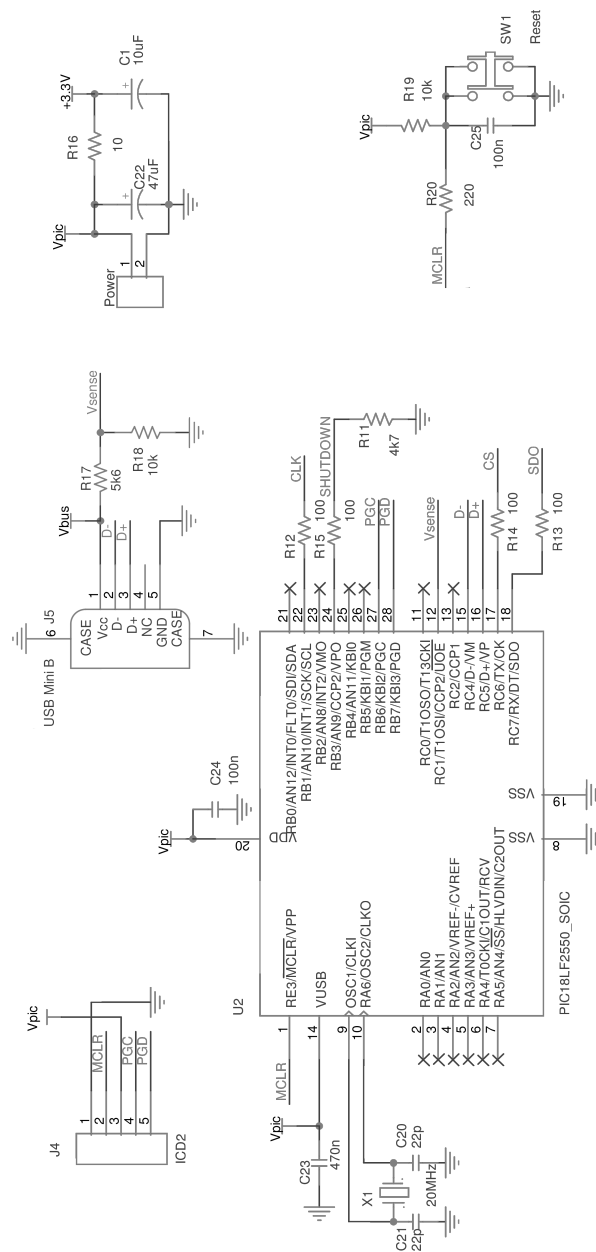


Figura B.18: Esquema elétrico da placa do Programador auxiliar do sintetizador baseado no PIC18LF2550.

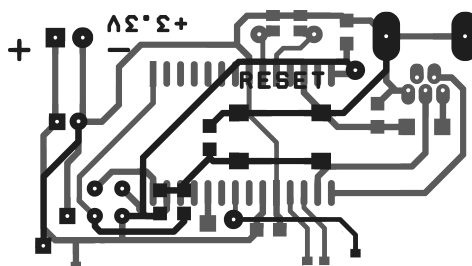


Figura B.19: *Layout* da placa de programação baseada no PIC18LF2550.

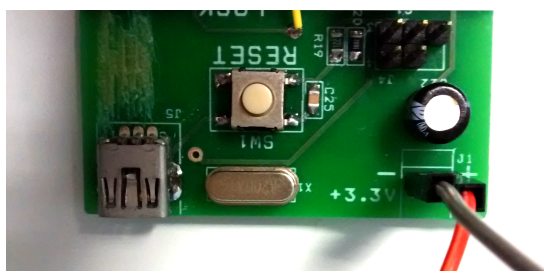


Figura B.20: Fotografia da camada superior da placa de programação baseada no PIC18LF2550.

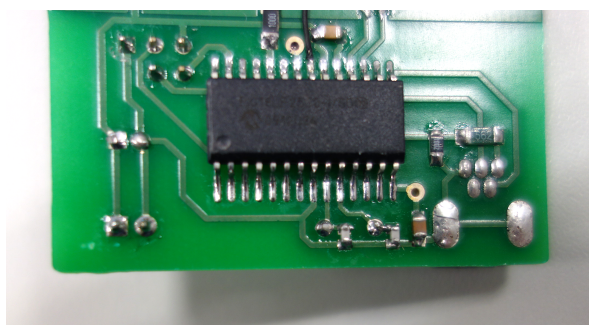


Figura B.21: Fotografia da camada inferior da placa de programação baseada no PIC18LF2550.

Anexo C

Imagens das Antenas construidas

No presente anexo são apresentadas fotografias das antenas RFID UHF.

C.1 Antena RFID banda americana



Figura C.1: Fotografia frontal da antena RFID para a banda americana.



Figura C.2: Fotografia lateral da antena RFID para a banda americana.

C.2 Antena RFID banda Europeia

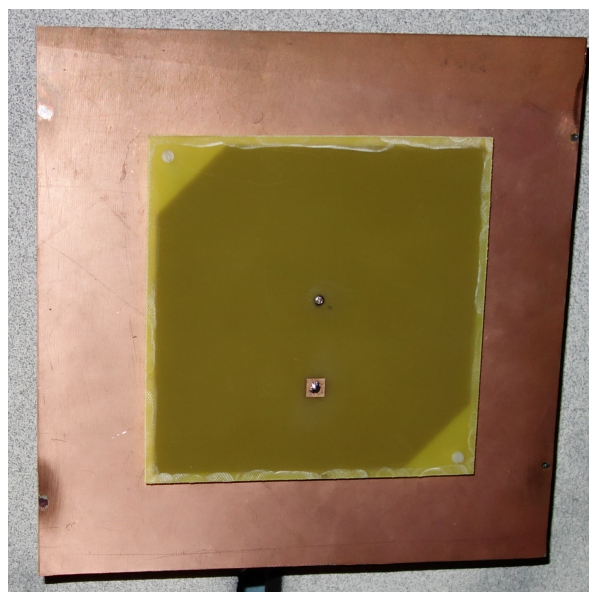


Figura C.3: Fotografia frontal da antena RFID para a banda europeia.

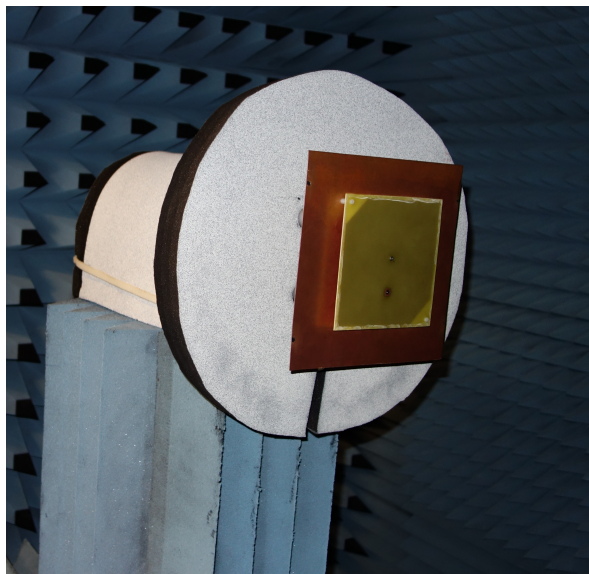


Figura C.4: Fotografia lateral da antena RFID para a banda europeia.

Bibliografia

- [1] RFID Market Is Expected to Reach at 30.24 Billion dollars in 2024. <http://www.sbwire.com/press-releases/rfid-market-is-expected-to-reach-at-3024-billion-in-2024-researchmozus-382880.htm>, 2015.
- [2] Jeremy Landt. IEEE - History Center. *Potentials, IEEE (Volume:24)*, 2005.
- [3] Daniel M. Dobkin. *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*. Amsterdam, Boston: Elsevier/Newnes, 2008.
- [4] H Casier. *Analog Circuit Design: Robust Design, Sigma Delta Converters, RFID*. Bélgica, 2010.
- [5] J Landt. The history of RFID. *Potentials, IEEE*, 24(4), 2005.
- [6] Bolic, M., et al. *RFID Systems: Research Trends and Challenges*. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
- [7] Microwave Ovens - GHN: IEEE Global History Network. http://ethw.org/Microwave_Ovens, 2015.
- [8] RFID - Identificação por Rádio Frequência. http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/rfid/funcionamento.html, 2015.
- [9] Hunt, V. D. *RFID: a Guide to Radio Frequency Identification*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007.
- [10] Hansen, W.-R. and Gillert. *RFID for the Optimization of Business Processes*. Chichester, England, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [11] K. Finkenzeller. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, 2nd ed.* Chichester, England ; Hoboken, N.J.: Wiley, 2003.
- [12] Hugo Miranda, Rômulo Antão, Hélder Machado, Ana Rita Ferreira, João Nuno Matos, Rui Escadas. Assessing the Performance of Inkjet-printed Coils on Paper Substrate for WPT. *URSI AT-RASC (Atlantic Radio Science Conference)*, 2015.
- [13] D Paret. *RFID at Ultra and Super High Frequencies: Theory and Application*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2009.
- [14] Cornel Turcu. *Current Trends and Challenges in RFID*. InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011.
- [15] Paul Sanghera. *RFID+ Study Guide and Practice Exam*. Syngress Publishing, Inc., 2007.
- [16] EPCglobal. <http://www.gs1.org/epcglobal>, 2015.
- [17] ISO - International Organization for Standardization. <http://www.iso.org/iso/home.html>, 2015.
- [18] GS1 The Global Language of Business. <http://www.gs1.org/>, 2015.
- [19] Glover, B. and Bhatt, H. . *RFID Essentials*. CA: O'Reilly, 2006.
- [20] UHF RFID Reader ICs. <http://ams.com/eng/Products/UHF-RFID/UHF-RFID-Reader-ICs>, 2015.
- [21] Indy RS2000. <http://www.impinj.com/products/reader-chips/indy-rs2000>, 2015.
- [22] CORERFID SHOP. www.rfidshop.com, Outubro 2015.
- [23] Barcodesinc Shop. www.barcodesinc.com, Outubro 2015.
- [24] AtlasRFIDStore. www.atlasrfidstore.com, Outubro 2015.
- [25] Diogo Ribeiro. Sistema de Medida Analógico-Digital para Software-Defined Radios. 2011.
- [26] Pedro Cruz, Nuno Borges Carvalho, and Kate Rmley. Designing and Testing Software Defined Radio. *IEEE microwave magazine*, page 83, 2010.

- [27] LT5575 - 800MHz to 2.7GHz High Linearity Direct Conversion Quadrature Demodulator. www.cds.linear.com/docs/en/datasheet/5575f.pdf, 2015.
- [28] ADF4351 - Wideband Synthesizer with Integrated VCO . <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf>, 2015.
- [29] LT5568 - 700MHz to 1050MHz High Linearity Direct Quadrature Modulator. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/5568f.pdf>, 2015.
- [30] B3717 - SAW RF filter. <http://en.tdk.eu/inf/40/ds/ae/B3717.pdf>, 2015.
- [31] B3588 - SAW RF filter. <http://en.tdk.eu/inf/40/ds/ae/B3588.pdf>, 2015.
- [32] MAX5864 Ultra-Low-Power, High-Dynamic-Performance, 22Msps Analog Front End. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5864.pdf>, 2015.
- [33] PIC18LF2550 - High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>, 2015.
- [34] Loop Antenna. <http://www.ets-lindgren.com/6512>, 2015.
- [35] Horn Antenna. <http://herrindesign.com/tmc/our-products/antennas/directional/horn-antennas/ho-90-20/>, 2015.
- [36] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [37] Polarization maintaining. <http://fibrepulse.com/technical/polarization-maintaining/>, Outubro 2015.
- [38] DR. John L. Volakis. *Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition*. McGraw-Hill Professional, 2007.
- [39] James J.R, P.S. Hall. *Handbook of Microstrip Antennas*. Peregrinus, 1988.
- [40] CST MICROWAVE STUDIO. <https://www.cst.com/products/CSTMWS>, 2015.
- [41] Y. F. Weng, S. W. Cheung and T. I. Yuk. Triple Band-Notched UWB Antenna using Meandered Ground Stubs. *Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough*, 2010.
- [42] Y. F. Weng, S. W. Cheung and T. I. Yuk. Effects of Ground-Plane Size on Planar UWB Monopole Antenna. *International technical conference of IEEE Region 10 (Tencon2010)*, pages 21–24, 2010.
- [43] Luiz Gonzaga Rios, Eduardo Barbosa Perri. *Engenharia das Antenas*. 1982.
- [44] T.H., Sterns. *Flexible Printed Circuitry*. McGraw-Hill, 1996.
- [45] G.P. Crawford. *Flexible Flat Panel Displays*. John Wiley & Sons, 2005.
- [46] A. Kishk. *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*. InTech, 2013.
- [47] Val R. Marinov, Orven Swensona,c, Yuriy Atanasova, Nathan Schnecka. Laser-assisted ultrathin bare die packaging: a route to a new class of microelectronic devices. *Proc. of SPIE*, 2013.
- [48] RFID at a glance. <http://www.schreiner-logidata.com/3/about-schreiner-logidata/rfid-technology/>, 2015.
- [49] Conductive Inks for RFID. www.rfidjournal.net/live05/Packaging/Room_colo.245pm.ludmerer.pdf, 2015.
- [50] John Stephen Smith. High Density, Low Parasitic Direct Integration by Fluidic Self Assembly (FSA). *IEEE International Electron Devices Meeting*, 2000.
- [51] RFID Tag PET Substrate. http://www.2cm.com.tw/coverstory_content.asp?sn=0708290016, 2015.
- [52] R.P. Tortorich, and J.W. Choi. Inkjet Printing of Carbon Nanotubes. *Nanomaterials*, 3, pages pp. 453–468, 2013.
- [53] G. Cummins and M.P.Y. Desmulliez. Inkjet Printing of Conductive Materials: a review. *Circuit World*, Vol. 38 Iss 4:pp.193 – 213, 2012.
- [54] Dimatix Presents DMP-2800 - A Revolutionary Materials Deposition System. www.fujifilmusa.com/press/news/display_news/newsID=880140, 2015.
- [55] Murata MAGICSTRAP RFID IC. www.mouser.com/ds/2/281/UHF_MAGICSTRAP_3216size_Technical_Data_Sheet_20121-466545.pdf, 2015.
- [56] Debatosh Guha, Yahia M.M. Antar. *Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2011.